



TUGAS AKHIR - MO 141326

**ANALISIS PERPANJANGAN UMUR OPERASI CALM BUOY
TUBAN MILIK PT PERTAMINA BERBASIS RESIKO**

FADLY AKBAR NASHER

NRP. 4312 100 144

Dosen Pembimbing

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Ir. Murdjito, S.T., M.T

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2016



TUGAS AKHIR - MO 141326

**ANALISIS PERPANJANGAN UMUR OPERASI CALM BUOY
TUBAN MILIK PT PERTAMINA BERBASIS RESIKO**

FADLY AKBAR NASHER

NRP. 4312 100 144

Dosen Pembimbing

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Murdjito, M.Sc., Eng

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2016



FINAL PROJECT - MO 141326

***THE RISK BASED SERVICE LIFE EXTENSION ANALYSIS OF
PT PERTAMINA CALM BUOY TUBAN***

FADLY AKBAR NASHER

NRP. 4312 100 144

Supervisors

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Murdjito, M.Sc., Eng.

Department of Ocean Engineering

Faculty of Marine Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2016

ANALISIS PERPANJANGAN UMUR OPERASI CALM BUOY TUBAN MILIK PT PERTAMINA BERBASIS RESIKO

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

FADLY AKBAR NASHER

NRP. 4312 100 144

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 1)
.....
2. Murdjito, M.Sc., Eng. (Pembimbing 2)
.....
3. Dr. Ir. Wahyu Citrosiswoyo, M.Sc. (Penguji 1)
.....
4. Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji 2)
.....

SURABAYA, JULI 2016

ANALISIS PERPANJANGAN UMUR OPERASI CALM BUOY TUBAN MILIK PT PERTAMINA BERBASIS RESIKO

Nama Mahasiswa : Fadly Akbar Nasher

NRP : 4312100144

Jurusan : Teknik Kelautan- FTK ITS

**Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.sc., Ph.D
Ir. Murdjito, M.Sc.,Eng.**

ABSTRAK

Setiap struktur memiliki batas umur yang diperbolehkan untuk dioperasikan. hal ini juga berlaku pada struktur bangunan lepas pantai terapung yang memiliki umur operasi yang harus dianalisis secara saintifik. Pada Tugas Akhir ini dibahas mengenai sebuah sistim tali tambat CALM Buoy yang dihubungkan pada Tanker berkapasitas 150.000 DWT. Sistim ini sudah beroperasi cukup lama sehingga diperlukan adanya upaya perpanjangan umur operasi berupa penggantian tali (*anchor leg*) yang diperhitungkan memiliki umur terkecil dan tingkat korosi yang sudah melebihi batas. Hal ini dilakukan dengan analisis kelelahan (*fatigue analysis*) dengan memasukkan ketebalan korosi pada *mooring chain* dalam analisis tersebut. Analisis memakai perangkat lunak yang disediakan oleh Bureau Veritas yaitu HydroSTAR V.7.25 untuk menghitung sifat hidrodinamis kapal Tanker dan Buoy, lalu dilanjutkan dengan perangkat lunak Ariane8 untuk *mooring analysis* dimana pada *Software* tersebut melakukan *Time Domain Simulation* yang dibutuhkan untuk menghitung umur kelelahan pada *anchor leg*. Metode *Rainflow Counting* dipakai dalam perhitungan siklus pada analisisnya. Setelah dilakukan analisa berupa pengaruh penggantian tali terhadap umur kelelahan, dilakukan analisa resiko yang memakai simulasi monte carlo untuk mendapatkan peluang kegagalan pada akhirnya dihasilkan keluaran berupa Matriks Resiko berdasarkan rules DNV RP-G101 . Hasil analisis menunjukkan bahwa umur sistim tambat meningkat menjadi 214 tahun dan peluang kegagalan untuk posisi *between line* 0.0005 dan 0.001 untuk posisi *in line*. Tingkat resiko pada sistim mengalami penurunan setelah penggantian tali tambat dengan level resiko pada aspek keselamatan dan lingkungan ialah ALARP dimana resiko masih dapat diterima sedangkan dalam aspek bisnis resiko tidak dapat diterima.

Kata Kunci : CALM Buoy, Tanker, *Fatigue*, *Mooring Analysis*, *Rainflow*, *Time Domain*, *Anchor Leg*, *Mooring Chain*, *Risk*, *Monte Carlo*.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**THE RISK-BASED SERVICE LIFE EXTENSION ANALYSIS OF PT
PERTAMINA CALM BUOY TUBAN**

Student's Name : Fadly Akbar Nasher
ID Number : 4312100144
Department : Teknik Kelautan- FTK ITS
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.sc., Ph.D
Ir. Murdjito, M.Sc., Eng.

ABSTRACT

Every Structure must have a limit life that allowed to be operated. This matter are implemented on offshore structure as well, consider it also have an operating life that need to be calculated scientifically. This final project discuss about a mooring system specifically CALM Buoy that moored to tanker ship with capacity 150.000 Deadweight. This system has operated long enough, thus the service life extension attempt is necessary. It can be done by replacing the mooring lines (anchor leg) that have the shortest remaining fatigue life and the corrosion that exceeding the limit criteria. This analysis are conducted in fatigue analysis by including corrosion thickness at mooring chain. This analysis using several software that provided by Bureau Veritas like HydroSTAR V.7.5 for both Tanker and Buoy modelling and hydrodynamic analysis as wel., then Ariane8 for mooring analysis where this software analyse the fatigue life at anchor leg through Time Domain Simulation. The fatigue analysis are calculated by using Rainflow Cycle Counting Method. After analysis for the life affected by mooring lines replacement, Risk Analysis conducted by using Monte Carlo Simulation to find the Probability of Failure (PoF) and risk matrix based on DNV RP-G101 can be determined. This structure's fatigue life are meet the safety criteria after replacing two mooring lines with the shortest life are 214 years. Also the probability of failure are 0.0005 in between line position and 0.001 for in line position. The system's risk level are degraded after mooring line replacement with risk level at ALARP for safety and enviroment aspects where the risk level are acceptable. However, risk level at business aspect are not acceptable.

Keywords: CALM Buoy, Tanker, Fatigue, Mooring Analysis, Rainflow, Time Domain, Anchor Leg, Mooring Chain, Risk, Monte Carlo.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
TITLE PAGE	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	viii
UCAPAN TERIMA KASIH	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	6
2.2.1 Gerakan Struktur Terapung	6
2.2.2 Spektra Gelombang	8
2.2.3 <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i>	9
2.2.4 Perilaku Gerak Kapal Tanker Kondisi Tertambat	10
2.2.4.1 <i>Second-Order Near Field Formulation</i>	12
2.2.5 Pembebanan	13

2.2.5.1 Beban Gelombang	14
2.2.5.2 Beban Angin	15
2.2.6 Metode Perhitungan Kelelahan.....	17
2.2.6.1 Rainflow Counting	17
2.2.6.2 Kurva T-N.....	18
2.2.7 Analisa Keandalan	19
2.2.7.1 Moda Kegagalan.....	20
2.2.7.2 Simulasi Monte Carlo	21
2.2.7.3 Peluang Kegagalan	21
2.2.8 Analisa Resiko	22
2.2.8.1 Matriks Resiko.....	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Diagram Alir	25
3.2 Prosedur Penelitian.....	27
3.3 Pengumpulan Data	28
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	30
4.1 Pemodelan	30
4.1.1 Pemodelan Kapal Tanker.....	30
4.1.2 Pemodelan CALM Buoy	31
4.1.3 Hidrostatik	32
4.2 Response Amplitude Operator (RAO)	34
4.3 Pemodelan Menggunakan ARIANE 8	42
4.4 Analisa Umur Kelelahan CALM Buoy Tuban.....	44
4.4.1 Pengaruh Penggantian Tali Terhadap Umur Kelelahan	47
4.4.1.1 Umur Kelelahan Setelah Penggantian Line 1	47
4.4.1.2 Umur Kelelahan Setelah Penggantian Line 1 dan Line 2.....	50
4.5 Analisa Keandalan CALM Buoy Tuban	53
4.5.1 Penentuan Variabel Acak dan Parameter Statistik Acak.....	53
4.5.2 Simulasi Monte Carlo	57

4.6 Analisa Resiko CALM Buoy Tuban	59
4.6.1 Konsekuensi Kegagalan	60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	64
5.1 Kesimpulan.....	64
5.2 Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN A	
LAMPIRAN B	
BIODATA PENULIS	

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 CALM Buoy Mooring System.....	1
Gambar 2.1 Six Degree of Freedom	7
Gambar 2.2 Perbandingan Gerak Eksitasi Kapal Tanker Tertambat	10
Gambar 2.3 Rainflow Counting	18
Gambar 2.4 Kurva T-N API RP 2SK.....	19
Gambar 2.5 Matriks Resiko DNV RP-G101	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian.....	25
Gambar 4.1 Pemodelan Visual Kapal Tanker	31
Gambar 4.2 Pemodelan Visual CALM Buoy Tuban	32
Gambar 4.3 Gerakan Surge Kapal Tanker	35
Gambar 4.4 Gerakan Sway Kapal Tanker	35
Gambar 4.5 Gerakan Heave Kapal Tanker	36
Gambar 4.6 Gerakan Roll Kapal Tanker	37
Gambar 4.7 Gerakan Pitch Kapal Tanker	37
Gambar 4.8 Gerakan Yaw Kapal Tanker.....	38
Gambar 4.9 Gerakan Surge dan Sway CALM Buoy	39
Gambar 4.10 Gerakan Heave CALM Buoy.....	40
Gambar 4.11 Gerakan Roll dan Pitch CALM Buoy	41
Gambar 4.12 Gerakan Yaw CALM Buoy	41
Gambar 4.13 Posisi Between Line ARIANE8.....	43
Gambar 4.14 Posisi In Line ARIANE8	43
Gambar 4.15 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan per Laju Korosi (In Line)	46
Gambar 4.16 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan per Laju Korosi (Between Line) ..	46
Gambar 4.17 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan per Laju Korosi	47
Gambar 4.18 Grafik Umur Kelelahan setelah Penggantian Line 1(In Line)	49
Gambar 4.19 Grafik Umur Kelelahan setelah Penggantian Line 1(Between Line)...	49
Gambar 4.20 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan setelah Penggantian Line 1	50

Gambar 4.21 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan setelah Penggantian Line 1 dan Line 2 (In Line)	51
Gambar 4.22 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan setelah Penggantian Line 1 dan Line 2 (Between Line)	52
Gambar 4.23 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan setelah penggantian Line1 & Line2	52
Gambar 4.24 Grafik Fit Distribution Log-normal 3P, Inv. Gaussian, dan Fatigue Life pada kondisi In Line.....	55
Gambar 4.25 Grafik fit distribution Weibull, Johnson SB, dan Gen Pareto pada kondisi Between Line	56
Gambar 4.26 Grafik Sensitivitas Simulasi pada kondisi sesudah dan sebelum penggantian tali tambat	59
Gambar 4.27 Kriteria Peluang Kegagalan DNV RP-G101	60
Gambar 4.28 Matriks Resiko DNV RP-G101 pada kondisi sebelum (biru) dan sesudah (putih) penggantian tali tambat.....	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Shape Coefficient for Wind Force Calculations	16
Tabel 2.2 Wind Pressure Height Coefficient Above the Design Water Surface	17
Tabel 3.1 Principal Dimension CALM Buoy Tuban	29
Tabel 3.2 Metocean Tuban	29
Tabel 3.3 Principal Dimension Tanker 150.000 DWT	29
Tabel 4.1 Principal Dimension Tanker 150.000 DWT	30
Tabel 4.2 Principal Dimension CALM Buoy	31
Tabel 4.3 Validasi Kapal Tanker 150.000 DWT	33
Tabel 4.4 Validasi CALM Buoy Tuban.....	34
Tabel 4.5 Data Anchor Leg CALM Buoy Tuban	42
Tabel 4.6 Hasil Analisis Umur Kelelahan pada posisi In Line (Annual Damage)	44
Tabel 4.7 Hasil Analisa Umur Kelelahan pada posisi Between Line (Annual Damage)	44
Tabel 4.8 Hasil Analisa Umur Kelelahan pada posisi In Line (Years).....	45
Tabel 4.9 Hasil Analisa Umur Kelelahan pada posisi Between Line (Years)	45
Tabel 4.10 Umur Kelelahan Pasca Penggantian Line 1 (In Line)	48
Tabel 4.11 Umur Kelelahan Pasca Penggantian Line 1 (Between Line).....	48
Tabel 4.12 Umur Kelelahan Pasca Penggantian Line 1 & Line 2 (In Line)	51
Tabel 4.13 Umur Kelelahan Pasca Penggantian Line 1 & Line 2 (Between Line) ...	51
Tabel 4.14 Parameter Statistik untuk Variabel Acak setelah penggantian tali	57
Tabel 4.15 Peluang kegagalan sebelum penggantian tali tambat.....	59
Tabel 4.16 Peluang kegagalan setelah penggantian tali tambat.....	59
Tabel 4.17 Ranking Peluang Kegagalan Sistem Berdasarkan DNV RP-G101	60

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini dengan semakin maraknya eksploitasi sumber energi tak terbarukan berupa Hidrokarbon menuntut kemajuan teknologi untuk terus memasok kebutuhan energi kehidupan masyarakat. Dengan semakin terbatasnya lahan eksploitasi hidrokarbon didaratan maka para *Oil Company* memerlukan teknologi yang dapat mengakomodasi eksploitasi bahkan produksi pada lautan lepas (*Offshore Technology*). Seiring berjalannya waktu lahirlah berbagai macam struktur yang dapat memfasilitasi kebutuhan tersebut seperti yang pada permulaannya ialah *Fixed Offshore Structure* yang berada pada kedalaman dangkal hingga *Floating Offshore Structure* yang dapat diaplikasikan pada kedalaman yang dalam.

Adapun teknologi yang membantu proses pendistribusian (*shipping*) antara Anjungan (*Platform*) dengan kapal pengangkut (*Tanker*) yaitu *Single Point Mooring* (SPM) yang berfungsi menjaga posisi kapal Tanker (*Station Keeping*) ketika proses penyaluran berlangsung (*Offloading*).

SPM yang bertipe *Catenary Anchored Leg Mooring* (CALM) Buoy ini memiliki Tali tambat (*Anchor Leg*) yang tertancap pada tiap sisinya untuk menjaga posisi Buoy, lalu *Floating Hose* sebagai pipa penyalur terapung yang tersambung dengan kapal Tanker, *Subsea Hose* sebagai pipa penyalur bawah laut yang tersambung dengan *Pipeline-End Manifold (PLEM)* di dasar laut. Sehingga secara keseluruhan CALM Buoy ini selain berfungsi sebagai sistem penambatan kapal Tanker, dapat pula berfungsi sebagai Muara atau Terminal Pipa Penyalur antara PLEM dan kapal Tanker.

Dengan fluktuasi harga minyak bumi membuat perusahaan migas untuk melakukan penghematan dalam merawat fasilitasnya. Maka daripada mengganti

struktur fasilitas tersebut dengan yang baru, akan lebih menghemat biaya jika struktur itu diperpanjang umurnya dengan melakukan *service life extension* (SLE) (John Wintle, 2008)



Gambar 1.1 CALM Buoy *Mooring System* (jeffwhiteley.com)

Pada Tugas Akhir ini, 150 CALM Buoy diasumsikan akan segera mencapai batas umur operasinya yaitu 10 tahun dan akan melakukan proyek perpanjangan umur hingga 4 tahun penambahan umur operasi.

Service Life Extension (SLE) dilakukan dengan mengganti tali tambat (*Anchor Leg*) pada segment dimana tali rantai sudah mencapai tingkat korosi yang tidak memenuhi kriteria keamanan. Selain itu karena mempertimbangkan efek pengenduran pada tali tambat, pada tugas akhir ini kami juga mengubah panjang tali tambat agar memiliki tegangan tali yang lebih ideal (Ma Kaitung, 2014)

150 CALM Buoy memiliki konfigurasi yaitu enam *Anchor Leg* dan mampu mengakomodasi kapal Tanker sebesar 150.000 DWT.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dirumuskan pada Tugas akhir ini ialah :

1. Berapa Umur Sisa Operasi CALM Buoy Tuban?
2. Bagaimana pengaruh penggantian Tali Tambat terhadap umur operasi CALM Buoy Tuban?
3. Bagaimana Resiko yang dialami setelah melakukan penggantian tali tambat?

1.3 Tujuan

Tujuan pada Tugas akhir ini ialah:

1. Mengetahui umur sisa operasi CALM Buoy Tuban
2. Mengetahui pengaruh penggantian Tali Tambat terhadap umur operasi CALM Buoy Tuban
3. Mengetahui Resiko yang dialami jika melakukan penggantian Tali Tambat

1.4 Manfaat

Manfaat dari tugas akhir ini ialah agar kita dapat memahami faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi penambahan umur dalam sisi desain selain itu dalam melakukan proyek perpanjangan umur operasi kita bisa mengukur resiko yang terjadi sehingga ada pertimbangan dan penanganan khusus di waktu kedepan.

1.5 Batasan Masalah

1. Analisis Perpanjangan umur ini berlokasi di daerah Tuban
2. Konfigurasi Anchor Leg yang dipakai ialah 6 *Anchor Legs*
3. Spektrum Gelombang yang dipakai ialah spektrum JONSWAP
4. Ukuran Kapal Tanker yang dimodelkan dan dianalisis adalah 150.000 DWT
5. Analisis memakai *software* Hydrostar V.7.5 untuk memodelkan dan menghitung *Motion*, sedangkan untuk *Mooring Analysis* seperti menghitung *tension* dan *Fatigue Life* SPM menggunakan *software* Ariane8
6. Pemodelan dan pergerakan *subsea hose* maupun *floating hose* diabaikan

7. Pemodelan tali *Hawser* digeneralisir menjadi *Chain Studlink* dan tidak diperhitungkan umur kelelahannya
8. Semua peralatan yang berada diatas CALM Buoy dan kapal Tanker diabaikan
9. Dalam perhitungan Umur Kelelahan struktur digunakan metode *Rainflow Counting* dengan menggunakan T-N *curves* untuk *mooring chain*
10. Data Inspeksi berupa *Corrosion Thickness* pada *Mooring Chain* diasumsikan dan perhitungan kelelahan mempertimbangkan Laju Korosi sebesar 0,2 mm/tahun, 0,4 mm/tahun, dan 0,7 mm/tahun

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Tugas akhir ini ialah sebagai berikut:

BAB I menjelaskan tentang latar belakang penelitian yang akan dilakukan, rumusan masalah, tujuan, manfaat, serta batasan masalah untuk membatasi ruang analisa pada tugas akhir ini.

BAB II menjelaskan mengenai kumpulan pustaka yang mendasari penelitian beserta teori-teori yang mendukung penelitian yang akan dilakukan.

BAB III menjelaskan mengenai langkah-langkah dalam melaksanakan penelitian tugas akhir, data yang digunakan, hingga metode yang dipakai.

BAB IV membahas hasil analisa yang telah dilakukan meliputi analisa hasil dan pembahasan dari hasil tersebut yang dapat menjawab rumusan masalah pada bab sebelumnya

BAB V menjelaskan tentang kesimpulan dari analisa yang didapat

BAB VI menampilkan seluruh informasi, referensi, dan dokumen tertulis yang dijadikan landasan dan pengembangan penelitian. Penulisannya mengikuti aturan *Harvard System*

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Melalui besarnya variasi beban lingkungan terhadap perubahan waktu seperti gelombang dan angin, dapat mengakibatkan fluktuasi tegangan pada bagian-bagian struktur yang tereksitasi pada bangunan lepas pantai terutama pada SPM. Fenomena fluktuasi tegangan ini biasa disebut sebagai kerusakan kelelahan struktur (*Fatigue damage*). untuk memprediksi kelelahan struktur ini ialah dengan memperoleh informasi kondisi beban yang diterima struktur pada saat beroperasi yakni dengan menggunakan persamaan Palmgren-Miner (Boonstra, et al 2002)

Analisa *Service Life Extension* dilakukan apabila suatu fasilitas akan digunakan melebihi batas umur desain yang telah dianalisis sebelumnya. Adapun beberapa penaksiran (*assessment*) dalam analisis ini secara kualitatif yakni memperbaharui performa, kebutuhan dalam modifikasi, pembaharuan rencana perawatan dan inspeksi, hingga penerapan kebutuhan akan dispensasi dan pengecualian. Dalam tugas akhir ini, penulis melakukan analisa perpanjangan umur operasi dalam sisi kuantitatif yakni dengan melakukan peremajaan bagian struktur dengan mengganti bagian yang sudah tidak layak ataupun mengubah konfigurasi. Analisa yang dapat dilakukan secara kuantitatif adalah pada struktur, *Pipelines*, *Position Mooring*, dan *flexible or steel catenary risers*. (Norsok, 2012)

Pada fasilitas bangunan terapung yang memakai sistem tali tambat CALM Buoy, perpanjangan umur dilakukan dengan mengganti bagian tali yang telah mengalami kerusakan akibat korosi maupun beban siklis yang sudah tidak memenuhi kriteria keamanan (*Ma-Kaitung, 2014*)

Dalam penelitian ini, dalam menganalisa resiko yang terjadi setelah penggantian Tali Tambat dilakukan dengan cara melakukan Simulasi *Monte Carlo*

karena simulasi ini mempertimbangkan variabel acak yang relevan dalam kasus ini, untuk mempertimbangkan resiko secara kualitatif memerlukan metode analisa yang lebih menyeluruh dan cukup akurat.

2.2 Dasar Teori

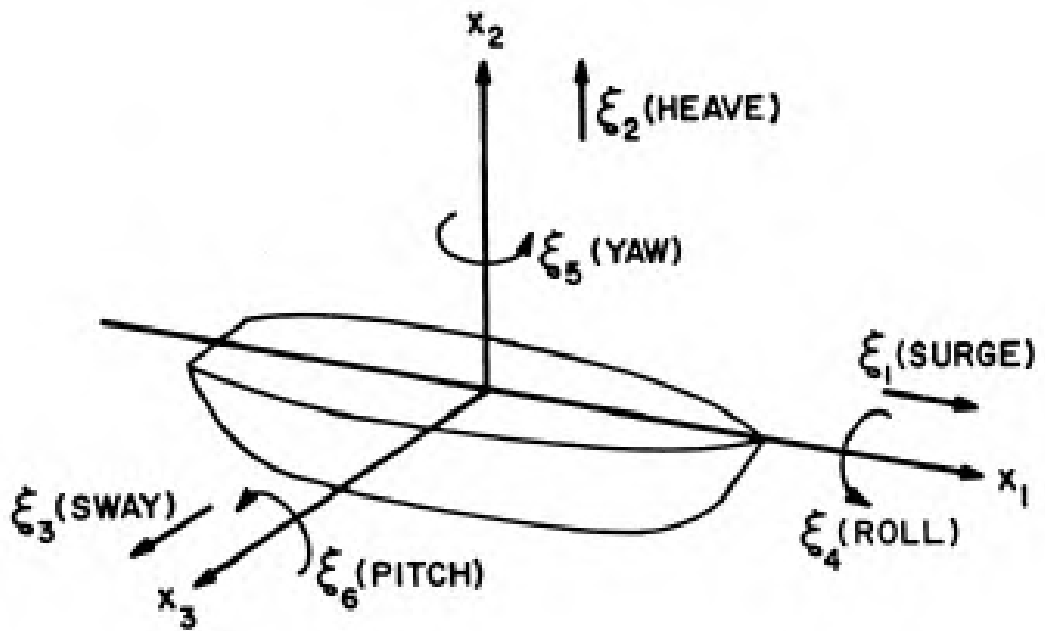
2.2.1 Gerakan Struktur Terapung

Faktor paling berpengaruh terhadap kekuatan sistem penambatan (*Mooring System*) adalah gerakan dari Kapal Tanker dan CALM Buoy akibat beban gelombang. Karena gerakan bangunan apung yang menimbulkan gaya inersia terhadap beban-beban operasi pada struktur

Pada dasarnya benda yang mengapung mempunyai enam mode gerakan bebas SDOF (*Six Degree Of Freedom*) yang terbagi menjadi dua jenis, yaitu tiga mode gerakan translasional dan tiga mode gerakan rotasional (Bhattacharyya, 1978). Keenam gerakan tersebut dapat dijelaskan pada gambar 2.1

Berikut adalah keenam mode gerakan tersebut:

1. Mode gerak translasional.
 - Surge, gerakan transversal arah sumbu x.
 - Sway, gerakan transversal arah sumbu y.
 - Heave, gerakan transversal arah sumbu z.
2. Mode gerak rotasional.
 - Roll, gerakan rotasional arah sumbu x
 - Pitch, gerakan rotasional arah sumbu y
 - Yaw, gerakan rotasional arah sumbu z



Gambar 2.1 Six Degree of Freedom

Enam mode gerakan bebas pada FPSO sangat berpengaruh pada beban yang diterima FPSO. Oleh Bhattacharyya (1978) ditunjukkan bahwa gerakan translasional ada empat gaya yang penting, yaitu gaya inersia, gaya damping, gaya restoring, gaya exciting. Seperti contoh, untuk gerakan surge, persamaannya yaitu:

- a) Gaya Inersia

$$F_a = -a \ddot{X} \dots \dots \dots (2.1)$$

dengan : a adalah massa kapal dan *added mass*, dan \ddot{X} adalah percepatan horizontal.

- b) Gaya damping

$$F_b = b \dot{X} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dengan : b adalah konstanta damping dan \dot{X} adalah kecepatan

- c) Gaya restoring

$$F_c = c X \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan : c adalah konstanta spring dan X adalah displacement *center of gravity* kapal

d) Gaya Exciting

Menurut Bhattacharyya (1978), gerakan rotasional ada empat momen penting yaitu momen inersia, momen damping, momen restoring, momen exciting. Persamaan untuk momen inersia yaitu :

$$I = mr^2 \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan :

m = massa kapal (kg)

r = Jari-jari girasi (m)

sedangkan untuk momen gaya persamaannya yaitu :

$$\text{Momen gaya} = I \alpha \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan :

α = Percepatan putar (rad/s^2)

I = Momen Inersia (kg.m^2)

Jari-jari girasi disini yaitu jarak antara titik berat kapal dengan titik berat Hull. Jadi untuk gerakan *roll*, *Pitch*, dan *yaw* yang membedakan hanya pada besarnya jari-jari girasi.

2.2.2 Spektra Gelombang

Spektra gelombang adalah karakteristik dari suatu gelombang pada perairan tertentu. Yaitu kontribusi intensitas gelombang-gelombang reguler dalam membentuk gelombang acak. Spektra gelombang dinyatakan dalam :

- Bentuk spektrum kepadatan energi gelombang (spektrum gelombang)
- Energi per 1 m^2 luas permukaan gelombang

Pada tugas akhir ini akan digunakan spektrum gelombang JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) untuk perhitungan gelombang. Berikut adalah persamaan dari spektrum JONSWAP:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[\frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2\tau^2 \omega_0^2} \right]} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan :

$S(\omega)$ = Spektrum gelombang

γ = Parameter puncak (*peakedness parameter*) bervariasi antara 1,0 s.d 7,0

τ = parameter bentuk (Shape parameter)

untuk $\omega \leq \omega_0 = 0,07$ dan $\omega \geq \omega_0 = 0,09$

$\alpha = 0,0076 (X_0) - 0,22$ untuk X_0 tidak diketahui $\alpha = 0,0081$

Persamaan JONSWAP dewasa ini banyak dipakai untuk analisis bangunan lepas pantai di Indonesia dengan mengambil harga γ sekitar 2,0 s.d 2,5. Artinya menurunkan puncak spektra, atau dengan kata lain dominasi tidak terkonsentrasi pada periode atau frekuensi gelombang tertentu saja.

2.2.3 *Response Amplitude Operator (RAO)*

Metode spektra merupakan cara untuk mengetahui suatu respon struktur akibat beban gelombang reguler dalam tiap-tiap frekuensi. *Response Amplitude Operator (RAO)* atau sering disebut sebagai *Transfer Function* adalah fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur *Offshore*. RAO dapat juga didefinisikan sebagai hubungan antara amplitudo respon terhadap amplitudo gelombang. Dapat dinyatakan dalam bentuk matematis yaitu ($\zeta_{\text{respon}} / \zeta_{\text{gelombang}}$). Amplitudo respon bisa berupa gerakan, tegangan, maupun getaran. RAO juga merupakan alat untuk mentransfer beban luar (gelombang) dalam

bentuk respon pada suatu struktur (Chakrabarti, 1987). Bentuk umum dari persamaan RAO dalam fungsi frekuensi adalah sebagai berikut :

$$Response(\omega) = (RAO)\eta(\omega).....(2.7)$$

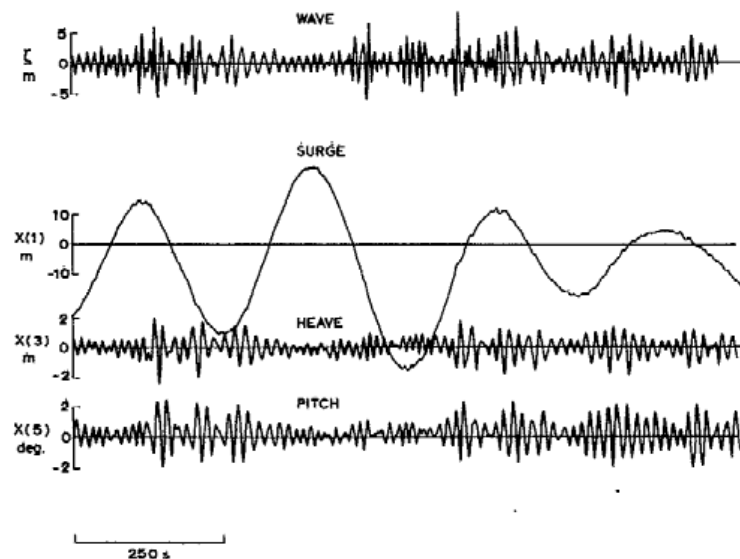
Dengan :

η = amplitudo gelombang (m)

ω = frekuensi angular (rad/s)

2.2.4 Perilaku Gerak Kapal Tanker Kondisi Tertambat

Dalam analisis pada sistem tali tambat memiliki beberapa perhitungan yang berbeda pada *Vessel* yang terlibat. Dalam kasus ini, Kapal Tanker pada kondisi tertambat yang dikenakan gelombang ireguler memiliki karakteristik berupa besarnya amplitudo pada frekuensi rendah (*Low Frequency*) dalam gerak *Surge* (Wichers, 1988) seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah:



Gambar 2.2 Perbandingan Gerak Eksitasi kapal Tanker Tertambat

Sehingga dalam analisis ini diperlukan perhitungan terhadap *Low-Frequency*. Berikut persamaan *Low Frequency* untuk kapal Tanker yang tertambat menurut (Wichers, 1988):

$$(m+\mu_{11}) \ddot{x}_1^{(2)} + \mu_{12} \ddot{x}_2^{(2)} + \mu_{16} \ddot{x}_6^{(2)} + (B_{11} + B_{wdd}) \dot{x}_1^{(2)} = F_1^{wind} + F_1^{current} + F_1^{wave(2)} + F_1^{moor} \dots(2.8)$$

$$\mu_{21} \ddot{x}_1^{(2)} + (m+\mu_{22}) \ddot{x}_2^{(2)} + \mu_{26} \ddot{x}_6^{(2)} + B_{22} \dot{x}_2^{(2)} = F_2^{wind} + F_2^{current} + F_2^{wave(2)} + F_2^{moor} \dots(2.9)$$

$$\mu_{61} \ddot{x}_1^{(2)} + \mu_{62} \ddot{x}_2^{(2)} + (I + \mu_{66}) \ddot{x}_6^{(2)} + B_{66} \dot{x}_6^{(2)} = F_6^{wind} + F_6^{current} + F_6^{wave(2)} + F_6^{moor} \dots\dots\dots(2.10)$$

dimana:

$x^{(2)}$ = low frequency motion

B_{11}, B_{22}, B_{33} = koefisien *damping*

B_{wdd} = koefisien *wave drift damping* arah sumbu-x

$F_i^{current}$ = *current force*

F_i^{wind} = *wind force*

F_i^{moor} = *mooring force*

$F_i^{wave(2)}$ = *second order wave drift force*

Dalam simulasi ranah waktu (*Time Domain Simulation*) pada *software* ARIANE mempertimbangkan kedua macam frekuensi gerakan, yaitu *first order high frequency motion* dan *second order low frequency* secara terpisah namun pada hasilnya, *Time Domain Simulation* dapat mengkombinasikan kedua jenis frekuensi gerakan tersebut (Bureau Veritas, 2015).

Berikut rumus *Wave Fruequency Motion* atau *First Order Motion* menurut (Liu dan Miao, 1987):

$$(M_{ij} + \mu_{ij}) \ddot{x}_j^{(1)} + \int_0^\infty K_{ij}(\tau) \dot{x}_j^{(1)}(t - \tau) d\tau + C_{ij} \dot{x}_j^{(1)} = F_i^{moor} + F_i^{wave(1)} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$i = 1, 2 \dots 6, j = 1, 2 \dots 6$$

dimana:

$x_i^{(1)}$ = *wave frequency motion*

$F^{wave(1)}$ = *first order wave force*

F^{moor} = *mooring force*

M = *inertia matrix FPSO*

2.2.4.1 *Second-Order Near Field Formulation*

Dalam analisa sifat-sifat hidrodinamis kapal Tanker kondisi terapung bebas, dilakukan analisa Pembebanan *Second Order* atau *Quadratic Transfer Function* (QTF) dalam *Software* Hydrostar v.7.5 dengan menggunakan *Near Field Formulation* dimana formulasi tersebut diturunkan dari tekanan yang terintegrasi pada lambung kapal (Chen, 2011).

Berikut rumus gaya dan momen QTF dengan formulasi *Near Field* menurut (Chen, 2011):

$$F_1 = -\frac{\rho g}{2} \oint_1 dl [\varepsilon^2 n - 2\varepsilon(X_n)k] + \frac{\rho}{2} \iint_H ds [(\nabla\Phi\nabla\Phi)_n + 2\nabla\Phi_t(bfX_n).....(2.12)$$

$$M_1 = -\frac{\rho g}{2} \oint_T dl [\varepsilon^2 (r \wedge n) - 2\varepsilon(X_n)(r \wedge k)] + \frac{\rho}{2} \iint_H ds [(\nabla\Phi\nabla\Phi)(r \wedge n) + 2(r \wedge \nabla\Phi_t)(X_n).....(2.13)$$

Dimana:

ρ = Massa Jenis Air Laut

g = Percepatan Gravitasi

ε = Elevasi *First Order*

Φ = Potensial Kecepatan

X = Displacement

T = perpotongan dengan H

H = Tinggi Hull

2.2.5 Pembebanan

Dalam proses perancangan struktur lepas panta, penentuan kemampuan kerja. Struktur dipengaruhi oleh beban yang bekerja pada struktur tersebut. Beban-beban yang harus dipertimbangkan oleh perancang dalam perancangan *offshore structure* adalah sebagai berikut:

1. Beban mati (dead load)

Beban mati adalah beban dari semua komponen kering serta peralatan, perlengkapan, dan permesinan yang tidak berubah dari mode operasi pada suatu struktur, meliputi; berat peralatan dan berat permesinan yang digunakan dalam proses pengeboran ketika sedang tidak dioperasikan.

2. Beban hidup (live load)

Beban hidup adalah beban yang terjadi pada struktur selama dipakai/berfungsi dan tidak berubah dari mode operasi satu ke mode operasi yang lain. Contoh beban yang termasuk ke dalam beban hidup ini adalah beban yang diakibatkan oleh pengoperasian mesin atau peralatan lainnya pada suatu struktur yang berhubungan dengan operasi struktur tersebut.

3. Beban akibat kecelakaan (accidental load)

Beban kecelakaan merupakan beban yang tidak dapat diduga sebelumnya yang terjadi pada struktur, misalnya tabrakan dengan kapal pemandu operasi. Putusnya tali tambat (*mooring*) dan kebakaran.

4. Beban lingkungan (*environmental load*)

Beban lingkungan adalah beban yang terjadi karena dipengaruhi oleh lingkungan dimana suatu struktur lepas pantai dioperasikan atau bekerja. Beban lingkungan yang digunakan dalam perancangan adalah beban angin, arus, dan gelombang.

Pada tugas akhir ini, pembebanan difokuskan pada beban yang mengenai *Hull Structure*, yang akan ditinjau pada tugas akhir ini adalah beban gelombang, beban angin, dan beban operasi yang terjadi pada struktur *topside module*.

2.2.5.1 Beban Gelombang

Dalam perhitungan beban gelombang, gelombang yang digunakan adalah gelombang *return period* untuk 1 tahunan, 10 tahunan, dan 100 tahunan. Periode ulang gelombang atau gelombang *return period* dapat dicari dengan analisis gelombang kurun waktu panjang [LTWA(*long term wave Analysis*)]. LTWA adalah analisis yang dilakukan terhadap kumpulan data-data gelombang yang telah diperoleh dalam kurun waktu 1 tahunan (minimal 1 tahun).

Distribusi gelombang dalam kurun waktu panjang dapat didekati dengan distribusi kontinyu dari Weibull. Persamaan linier dari fungsi kepadatan peluang PDF (*probability density function*) diberikan dalam bentuk sebagai berikut :

$$\ln \left[\ln \left\{ \frac{1}{1-P(H)} \right\} \right] = \xi \ln x - \xi \ln \lambda \dots \dots \dots (2.14)$$

dengan:

$P(H)$ = peluang terjadinya gelombang

ξ = parameter bentuk dengan harga umum antara 0,75 s.d 2,0. Sedangkan untuk gelombang laut umumnya berkisar antara 0,9 s.d 1,1 (Naess; 0,7 s.d 1,3)

λ = parameter skala yang harganya tergantung dari harga ekstrim variabel x atau untuk gelombang laut adalah harga tinggi ekstremnya, yakni yang terjadi sekali dalam kurun waktu panjang (m)

x = Intensitas obyek/parameter yang ditinjau; misalnya tinggi gelombang

Distribusi Weibull dapat diaproksimasi dengan kurva berbentuk garis lurus bila variabel x pada ruas kanan persamaan di atas diganti dengan $(H - a)$.

Variabel a disini adalah ukuran ambang tinggi gelombang (threshold wave height), yaitu tinggi gelombang terkecil yang terjadi di suatu perairan. Untuk perairan tertutup a dapat mempunyai harga sangat kecil (≈ 0), sedangkan untuk perairan terbuka dapat mempunyai harga antara 0,5 s.d 2,0 m. Kurva distribusi weibull akan mempunyai bentuk garis lurus jika digambarkan pada grafik yang mengkorelasikan $\ln\{\ln[1/1-P(H)]\}$ sebagai ordinat dan $\ln(H - a)$ sebagai absisnya.

Tinggi gelombang yang digunakan adalah tinggi gelombang signifikan (H_s), jika gelombang yang diketahui adalah tinggi gelombang maksimum (H_{max}), maka H_s dapat dicari dengan :

$$H_s = H_{max}/1.86 \dots \dots \dots (2.15)$$

2.2.5.2 Beban Angin

Untuk menghitung kecepatan angin pada elevasi diatas 30ft (9,144m) dari permukaan air, digunakan hukum one-seventh power (Dawson, 1983) yang dapat digunakan hingga kecepatan angin pada elevasi 600ft (182,88 m). Persamaan tersebut :

$$V = V_0 \left(\frac{y}{10} \right)^{\frac{1}{7}} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dengan:

V = Kecepatan angin pada elevasi y (ft/s)

V_0 = Kecepatan angin pada elevasi 30 ft (ft/s)

y = elevasi yang akan dihitung kecepatan anginnya (ft)

untuk gaya angin yang mengenai struktur, dapat dicari dengan persamaan (ABS, 2001) :

$$F = \frac{1}{2} * \rho * C_s * C_h * A * V^2 \dots \dots \dots (2.16)$$

Dengan :

F = Gaya Angin (N)

ρ = massa jenis udara (1,226 kg/m³)

C_s = Koefisien dari bentuk benda yang terkena angin

C_h = Koefisien dari ketinggian benda

A = Area/luasan yang terkena gaya angin (m²)

V = Kecepatan angin (m/s)

Nilai C_s berbeda-beda tergantung pada bentuk benda atau objek yang terkena angin. Nilai dari koefisien (C_s) menurut ABS disajikan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Shape Coefficient for Wind Force Calculations (ABS MODU part3, 2001)

Shape of Structure	C_s
Spherical	0.40
Cylindrical Shape (all sizes) used for crane pedestals, boom, helidecks, etc	0.50
Hull, Based on block projected area	1.00
Deck houses	1.00
Clusters of deck houses and other structures, based on block projected area	1.10
Isolated structural shapes (e.g, cranes, angle channel beams, etc.)	1.50
Under deck areas (smooth)	1.00
Under deck surface (exposed beams and girders)	1.30
Rig derrick, each face, assuming fabricated from angle.	1.25

Sedangkan nilai dari Ch disajikan pada tabel 2.2 :

Tabel 2.2 Wind Pressure Height Coefficient Above the Design Water Surface
(ABS MODU Part 3, 2001)

Height (m)	Height (ft)	Ch
0.0 – 15.3	0 – 50	1.00
15.3 – 30.5	50 – 100	1.10
30.5 – 46.0	100 – 150	1.20
46.0 – 61.0	150 – 200	1.30
61.0 – 76.0	200 – 250	1.37
76.0 – 91.5	250 – 300	1.43
91.5 – 106.5	300 – 350	1.48

2.2.6 Metode Perhitungan Kelelahan

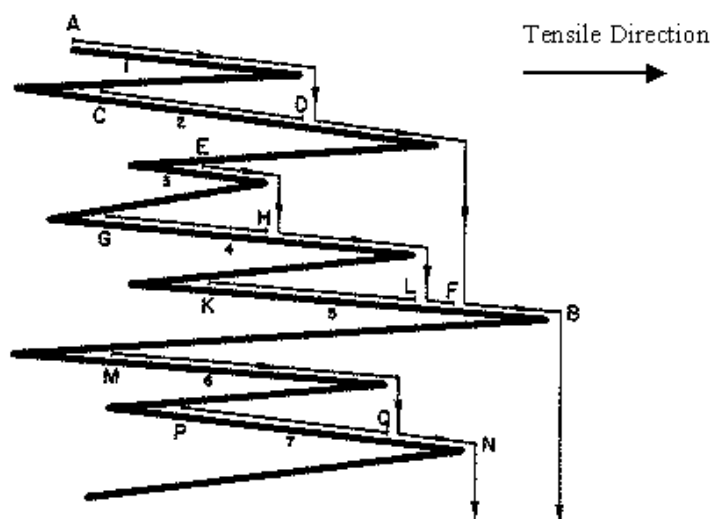
Pada umumnya, terdapat dua metode untuk menganalisis kelelahan, yaitu dengan pendekatan kurva S-N yang dibuat berdasarkan uji kelelahan pada kasus riil, dan pendekatan mekanika kepecahan (*Fracture Mechanic Approach*). Untuk tujuan desain kelelahan pada Mooring Lines, dapat kita ambil pendekatan kurva T-N (Tension-N) karena metode tersebut adalah metode yang lebih aplikatif dalam mendesain umur kelelahan. Berbeda dengan metode mekanika kepecahan yang lebih aplikatif pada ranah inspeksi.

2.2.6.1 Rainflow Counting

Rainflow Counting merupakan metode perhitungan siklus yang pertama kali dikemukakan oleh Tetsuo Endo (1968). Metode ini lazim dan direkomendasikan untuk mengestimasi kerusakan akibat kelelahan dalam pembebanan yang bersifat acak (*Random*). setelah itu Rychlik (1987) memberikan definisi matematis pada Rainflow Counting. Metode Rainflow adalah metode yang aplikatif untuk

pembebanan yang bersifat acak atau *time history* baik itu *High Frequency* maupun *Low Frequency* (Michel&Zakoua, 2008)

Nama “Rainflow” itu sendiri diadaptasikan dari Atap Pagoda yang menerima curah hujan. Sehingga cara perhitungan siklusnya mengikuti asas jatuhnya air dari atap yang paling atas hingga ke atap yang bawah secara berurutan seperti yang ditampilkan pada gambar di bawah:



Gambar 2.3 Rainflow Counting (afgrow.net)

2.2.6.2 Kurva T-N

Kurva T-N (perbandingan antara *Tension* dengan jumlah kejadian) pada *Mooring lines* terutama pada *Anchor Legs*. Adapun persamaan yang dapat dipakai untuk menghitung dan memakai kurva T-N yang berlaku untuk *wire-rope*, *chain*, dan *connecting links* (API RP 2 SK, 1996) ialah:

$$NR^M = K \dots\dots\dots(2.17)$$

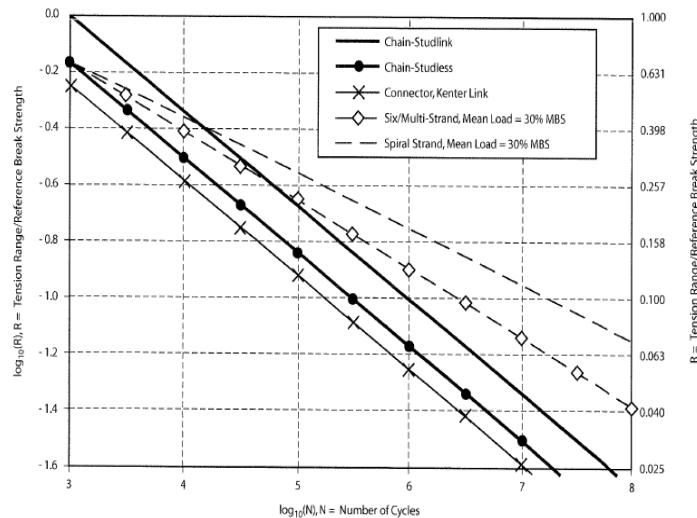
Dimana :

N = jumlah siklus

R = rasio dari *tension range (double amplitude)* menuju *nominal breaking strength*

M = Slope dari kurva T-N

K = Perpotongan dari Kurva T-N



Gambar 2.4 Kurva T-N, API RP 2SK 3rd Edition (2005)

2.2.7 Analisa Keandalan

Analisa Keandalan adalah analisa yang menguji suatu sistem apakah sebuah sistem tersebut dapat diandalkan (*Reliable*) atau tidak dalam tekanan atau beban yang bersifat acak atau sulit diprediksi. Menurut Daniel (2007), Keandalan sebuah komponen atau sistem adalah peluang komponen atau sistem tersebut untuk memenuhi tugas yang telah ditetapkan tanpa mengalami kegagalan selama kurun waktu tertentu apabila dioperasikan dengan benar dalam lingkungan tertentu. Dalam menganalisa keandalan terdapat beberapa metoda yang dapat dipakai seperti metoda *Reliability Block Diagram (RBD)*, *Fault Tree Analysis (FTA)*, *Mean Value First Order Second Moment (MVOSM)*, *Advanced First Order Second Moment (AFOSM)*, dan metode simulasi *Monte Carlo*.

Tugas Akhir ini menggunakan metode simulasi *Monte Carlo* dikarenakan sistem yang dipakai yakni berupa *Mooring System* yang berada pada laut lepas

(Offshore) memiliki ketidakpastian yang cukup signifikan, ketidakpastian tersebut adalah beban-beban yang bersifat acak yaitu angin, gelombang, dan arus. Maka untuk menghitung keandalan pada CALM Buoy Tuban memakai simulasi *Monte Carlo* yang dapat memperhitungkan variabel-variabel acak tersebut.

2.2.7.1 Moda Kegagalan

Sebelum menganalisis peluang kegagalan sebuah sistem dengan menggunakan simulasi *monte carlo*, Moda Kegagalan perlu ditentukan terlebih dahulu. Moda kegagalan adalah suatu persamaan kriteria dimana sebuah sistem dapat dinyatakan gagal atau tidak. Secara statistik, moda kegagalan memiliki variabel kontrol dan variabel acak.

Dalam tugas akhir ini, moda kegagalan yang dipakai adalah persamaan *Fatigue Strength Check* yang diperuntukkan untuk perpanjangan umur operasi (*Service Life Extension*) yang disediakan oleh rules ABS.

Persamaan umum moda kegagalan ialah sebagai berikut:

$$MK = K - B \dots\dots\dots(2.18)$$

dengan :

K = variabel kekuatan

B = variabel beban\

Sedangkan persamaan moda kegagalan dengan memakai Remaining Fatigue Strength Check ialah sebagai berikut:

$$D_p \cdot \alpha + D_e \cdot FDF \cdot L \leq 1 \dots\dots\dots(2.19)$$

Dengan:

D_p = Damage yang terjadi dimasa lampau (yang sudah terjadi)

D_e = Damage yang diprediksi setelah perpanjangan umur operasi

α = Reduced Safety Factor

L = *Requested Life Extension* (Umur perpanjangan yang diinginkan)

FDF = *Safety Factor for Fatigue Life*

2.2.7.2 Simulasi Monte Carlo

Simulasi *Monte Carlo* adalah tipe simulasi yang mengandalkan *Sampling* acak yang berulang dan analisa statistik untuk menghitung hasilnya, secara metodologi, Simulasi *Monte* menggunakan *What-If* analysis. (Ryachauduri, 2008)

Ada beberapa langkah umum yang dilakukan dalam melakukan simulasi *Monte Carlo*, yaitu:

1. Pemodelan Statis

Setiap simulasi *Monte Carlo* dimulai dengan mengembangkan model deterministik yang mendekati dengan skenario yang sesungguhnya. Dalam model deterministik ini, kita memakai nilai yang mendekati dari Input Parameter

2. Identifikasi Input Distribusi

Ketika kita sudah puas dengan model deterministik, kita memasukkan komponen resiko dalam model. Pada bagian ini, kita memerlukan data historis dari kasus yang ada

3. Memasukkan Variabel Acak

Setelah mengidentifikasi distribusi pokok untuk memasukkan variabel, kita bisa menentukan sekelompok variabel acak dari distribusi ini.

2.2.7.3 Peluang Kegagalan

Peluang kegagalan merupakan hasil keluaran (*Output*) dari simulasi *monte carlo* yang menggunakan sejumlah simulasi. Berikut metode menghitung peluang kegagalan setelah melakukan simulasi *Monte Carlo*

$$P_g = n/N_K \dots\dots\dots(2.20)$$

Dengan :

P_g = peluang gagal dari seluruh kejadian

N_K = jumlah seluruh kejadian

n = jumlah kejadian gagal

2.2.8 Analisa Resiko

Tidak ada suatu sistem yang direkayasa manusia itu ideal, akan selalu ada resiko yang ditempuh dalam pengoperasiannya. Resiko yang tidak mudah ditafsir karena memiliki variabel yang acak memberikan dampak ketidakandalan dari suatu sistem yang bekerja

Adapun hubungan antara Keandalan (K), Ketidakandalan (P_g)(Peluang kegagalan) Resiko (R), dan konsekuensi kegagalan (C) ialah sebagai berikut:

$$K = 1 - P_g \dots\dots\dots(2.21)$$

$$R = P_g \times C \dots\dots\dots(2.22)$$

Secara garis besar ketidakpastian dapat dikelompokkan menjadi tiga (Daniel, 2007):

1. Ketidakpastian fisik, yaitu variabilitas terjadi pada besaran-besaran beban, dan dimensi seperti lebar, tebal, diameter, dsb.
2. Ketidakpastian statistik digambarkan dengan adanya standar deviasi dalam pengolahan statistik
3. Ketidakpastian model, adalah ketidakpastian ketika membuat model dengan berbagai asumsi. Ketidakpastian ini digambarkan dalam istilah *Distance to Reality* (DTR)

2.2.8.1 Matriks Resiko

Matriks resiko adalah matriks yang dapat digunakan untuk menentukan besar resiko yang telah ditetapkan. Setiap kotak dari maktrijs tersusun dari kombinasi tertentu terhadap kegagalan dan telah ditentukan secara prioritas.

Dalam Tugas Akhir ini, penulis memakai kriteria resiko berdasarkan DNV RP-G101 yang memakai matriks resiko dengan acuan Probability of Failure (PoF) yang pada akhirnya memberikan keluaran (*Output*) berupa Matriks Resiko seperti gambar di bawah ini

PoF Ranking	PoF Description	A	B	C	D	E
5	(1) In a small population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in the location.	YELLOW	RED	RED	RED	RED
4	(1) In a large population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in operating company.	YELLOW	YELLOW	RED	RED	RED
3	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a small number of components. (2) Failure has occurred in the operating company.	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED	RED
2	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED
1	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW
CoF Types	Safety	No Injury	Minor Injury Absence < 2 days	Major Injury Absence > 2 days	Single Fatality	Multiple Fatalities
	Environment	No pollution	Minor local effect. Can be cleaned up easily.	Significant local effect. Will take more than 1 man week to remove.	Pollution has significant effect upon the surrounding ecosystem (e.g. population of birds or fish).	Pollution that can cause massive and irreparable damage to ecosystem.
	Business	No downtime or asset damage	< € 10.000 damage or downtime < one shift	< € 100.000 damage or downtime < 4 shifts	< € 1.000.000 damage or downtime < one month	< € 10.000.000 damage or downtime one year
CoF Ranking		A	B	C	D	E

Gambar 2.5 Matriks Resiko DNV RP-G101

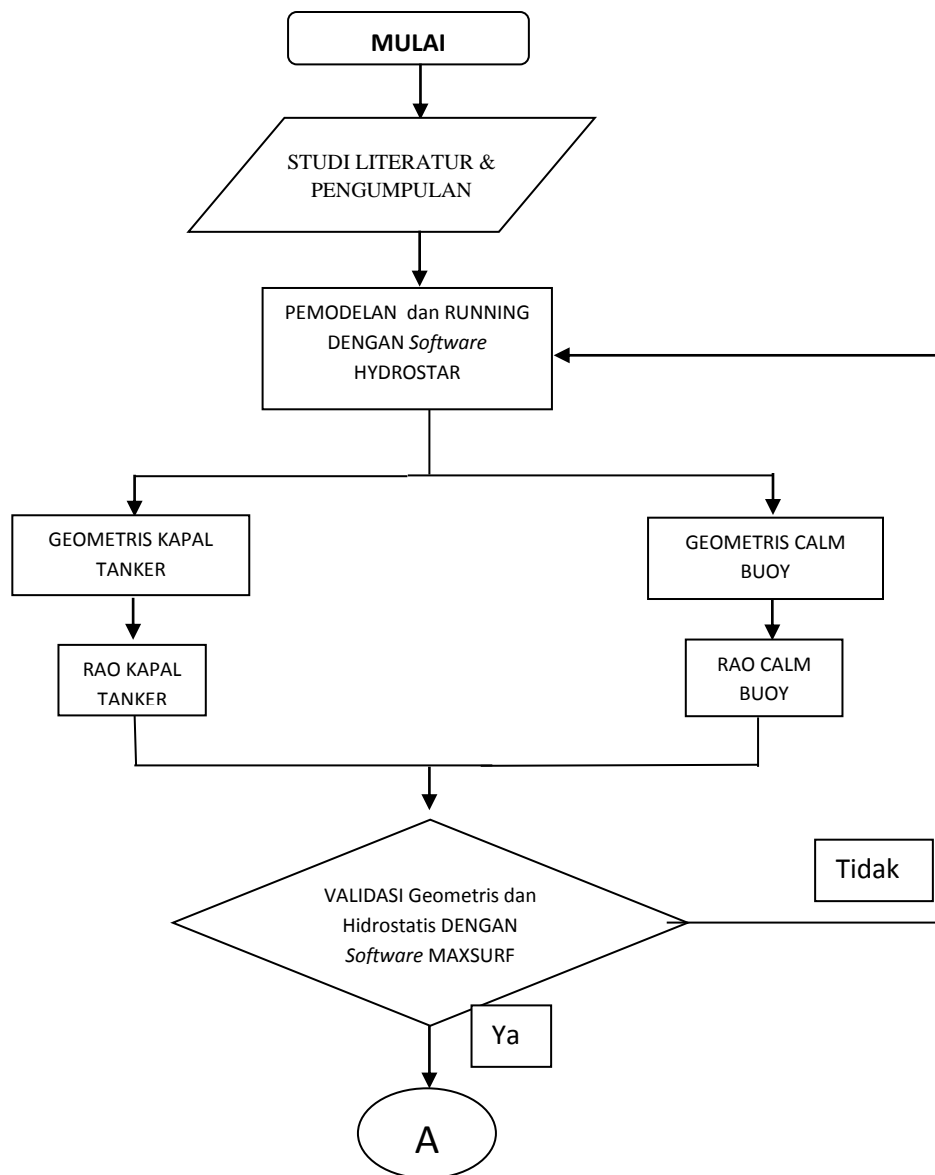
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

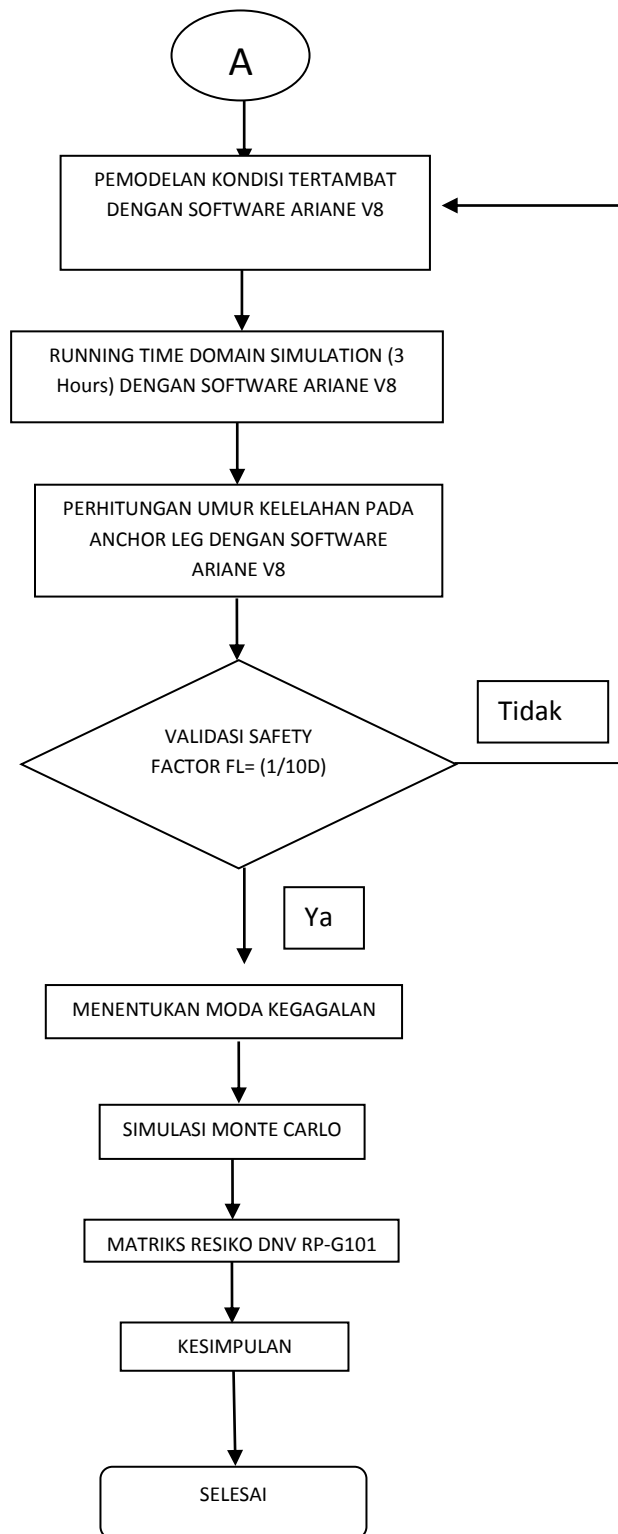
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Pada pengerjaan tugas akhir ini memakai bantuan *software* dan dapat digambarkan dengan diagram alir (*flow chart*) berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian (lanjutan)

3.2 Prosedur Penelitian

Sesuai dengan diagram alir yang sudah ditampilkan diatas, tahapan-tahapan penelitian dijelaskan sebagai berikut:

a.) Studi Literatur

Pada tugas akhir ini mengambil literatur dari bahan-bahan yang dibutuhkan menyangkut penelitian ini seperti *Paper*, Buku, Jurnal, Materi Perkuliahan yang memiliki keterkaitan terhadap penelitian ini. *Codes* atau *Rules* yang relevan mendasari penelitian ini.

b.) Pengumpulan Data

Pengumpulan data ialah menyangkut data SPM CALM Buoy seperti dimensi Buoy, *Arrangement*, dan data *Mooring Chain* yang berada dituban milik PT.Pertamina beserta data lingkungannya (*Metocean*). Data didapatkan dari PT.Pertamina.

c.) Pemodelan dan *Running Software* Hydrostar V.7.5

Kapal dimodelkan menggunakan *Software* Hydrostar V.7.5 dengan *input* awal berupa ordinat kapal lalu menggunakan Command “HSMSH” yang memunculkan bentuk dan meshing kapal. Setelah itu “HSLEC” untuk membaca *Mesh* kapal yang telah terbentuk, setelah itu pengecekan terlebih dahulu dengan ”HSCHK” bilamana terdapat kesalahan atau ketidakcocokan Ordinat yang dimasukkan. Lalu mulai analisis Hidrodinamis Vessel (Tanker dan Buoy) dengan *Command* HSRDF, HSMCN, HSQTF, dsb. Keluaran dari *software* Hydrostar V.7.5 ialah RAO, Added Mass, QTF, Damping, dll

d.) Validasi Geometris

dilakukan dengan membandingkan data hidrostatik *Vessel* seperti titik Buoyancy, WPA, titik Metacentre, dan sebagainya yang keluar dari *software* Hydrostar 7.5 dengan Maxsurf V.8i

e.) Pemodelan Kondisi Tertambat dengan *software* ARIANE8

Pemodelan kondisi tertambat menggunakan *software* ARIANE8 dengan memasukkan *input* kondisi pembebanan (*Loadcase*) hidrostatik dan hidrodinamis *vessel* (Buoy dan Tanker) serta menyusun posisi jangkar hingga penentuan panjang

tali yang cocok (*Pretension*) sebelum melakukan simulasi ranah waktu (*Time Domain Simulation*)

f.) *Running Time Domain Simulation*

Simulasi ranah waktu dengan rentang waktu 10800 sekon berikut dengan pembebanan hingga data lingkungan yang telah dimasukkan

g.) Perhitungan Umur Kelelahan pada *Anchor Leg* menggunakan ARIANE8

Perhitungan ini dilakukan setelah selesai simulasi ranah waktu. Yakni dengan memasukkan Tension Range tiap siklusnya menggunakan metode Rainflow dan dihitung menggunakan kurva T-N. perhitungan ini memiliki *output* berupa *Damage* selama simulasi, *Annual Damage*, dan *Expected Years*.

h.) Validasi *Safety Factor* Perpanjangan Umur dengan ABS

Validasi hasil umur kelelahan dengan rules ABS

i.) Menentukan Moda Kegagalan

Menentukan moda kegagalan untuk analisa keandalan. Moda kegagalan yang dipakai ialah persamaan *fatigue strength check* pada ABS

j.) Simulasi *Monte Carlo*

Ini dilakukan untuk mencari peluang kegagalan pada *mooring system* dengan variabel acak berupa *Damage*.

k.) Matriks Resiko

Menentukan besarnya resiko beserta konsekuensinya dengan menggunakan matriks yang disediakan oleh DNV RP-G101

l.) Kesimpulan

Menyimpulkan hasil Analisa keseluruhan yang menjawab rumusan masalah yang telah dirumuskan.

3.3 Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan meliputi data *Principal Dimension* pada Tanker, Buoy, data lingkungan (*metocean*), dan data *Anchor Leg*. Data-data tersebut disajikan dalam tabel 3.1 hingga 3.3 di bawah ini:

Tabel 3.1 Principal Dimension CALM Buoy Tuban

Jenis Data	Besar	Satuan
Hull diameter	11	m
Center well diameter	3.7	m
Skirt Diameter	15	m
Hull depth	4.5	m
Draft	2.95	m

(Sumber : PT. Pertamina)

Tabel 3.2 Metocean Tuban

Type	Condition		Units
	Survival	Operating	
Wind Velocity	19.4	11.2	m/s
Significant Wave Height	4.6	3.1	meter
Significant Wave Period	8.7	6.9	sec
Current speed	0.95	0.75	m/s

(Sumber : IKPT 2008)

Dikarenakan data kapal Tanker tidak tersedia, maka Tanker dimodelkan dengan asas *Sistership* (Kristensen & Lutzen, 2012). Yaitu pemodelan berdasarkan pendekatan statistik Tanker sedunia dengan titik ukur awal berupa kapasitas DWT dari Tanker yang ingin dimodelkan. Pada kasus ini, Tanker yang dimodelkan berkapasitas 150.000 DWT. Berikut *Principal Dimension* kapal tanker yang didapat melalui metoda tersebut:

Tabel 3.3 *Principal Dimension* Tanker 150.000 DWT

Type	Value	Units
LWL	271.5	meter
LPP	262	meter
Breadth	47	meter
Depth	23	meter
Draft (Full Load)	17	meter
Cb	0.825	-

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan

4.1.1 Pemodelan Kapal Tanker

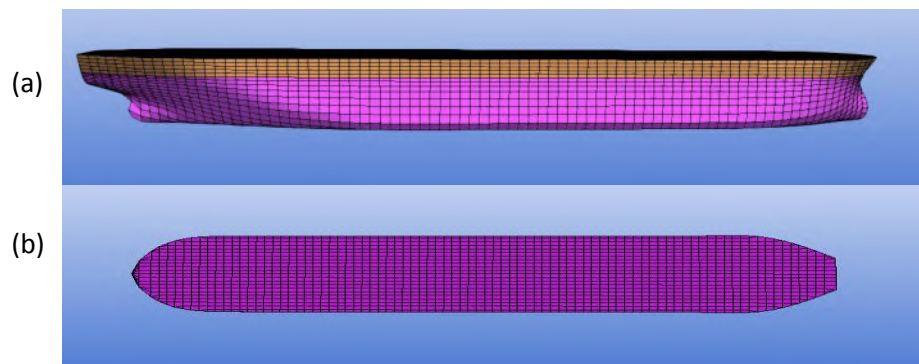
Kapal Tanker dimodelkan melalui asas pendekatan “Sistership” yang merupakan data statistik berbasis Deadweight (DWT) dalam penelitian yang dilakukan oleh (Kristensen & Lutzen, 2012). Dalam tugas akhir ini, kapal yang dimodelkan dibobotkan sebesar 150.000 DWT sesuai dengan kapasitas CALM Buoy Tuban milik PT.Pertamina.

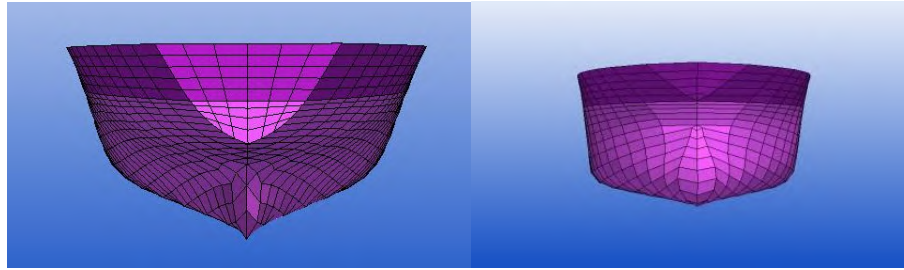
Adapun *Principal Dimension* yang didapatkan melalui asas tersebut seperti di bawah ini:

Tabel 4.1 *Principal Dimension* Tanker 150.000 DWT

Type	Value	Units
LWL	271.5	meter
LPP	262	meter
Breadth	47	meter
Depth	23	meter
Draft (Full Load)	17	meter
Cb	0.825	-

Pemodelan dilakukan dengan *Software* Hydrostar V7.5 dan dapat dilihat dalam gambar dibawah:





(c)

(d)

Gambar 4.1 Pemodelan Visual Kapal Tanker tampak samping (a), tampak atas (b), tampak belakang (c), dan tampak depan (d) melalui Hydrostar V7.5

4.1.2 Pemodelan CALM Buoy

CALM Buoy yang dimodelkan adalah 150 CALM Buoy – Tuban milik PT. Pertamina dengan kapasitas 150.000 DWT. Sama halnya dengan pemodelan Tanker, CALM Buoy Tuban ini dimodelkan dengan *Software* Hydrostar V7.5

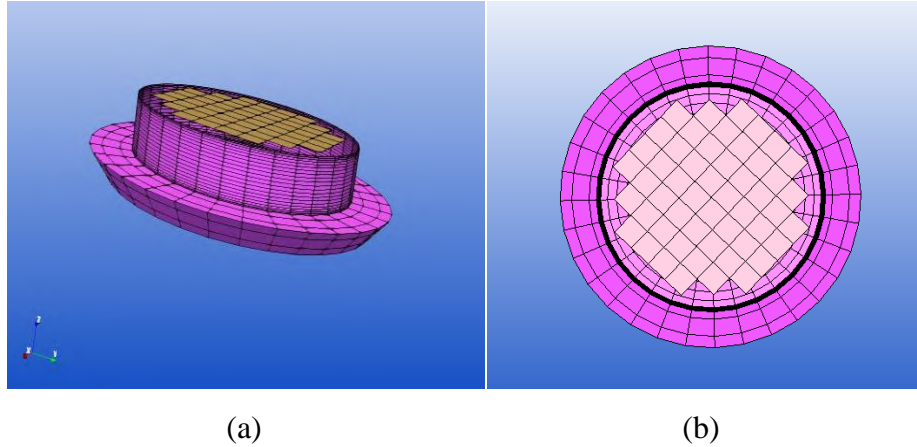
Adapun *Principal Dimension* yang dimiliki oleh CALM Buoy tersebut:

Tabel 4.2 Principal Dimension CALM Buoy

Jenis Data	Besar	Satuan
Hull diameter	11	m
Center well diameter	3.7	m
Skirt Diameter	15	m
Hull depth	4.5	m
Draft	2.95	m

(Sumber : PT. Pertamina)

Berikut pemodelan visual melalui *Software* Hydrostar 7.5:



Gambar 4.2 Pemodelan Visual CALM Buoy Tuban tampak samping (a) dan tampak atas (b) melalui *Software Hydrostar 7.5*

4.1.3 Hidrostatik

Dalam setiap penelitian model yang akan dianalisis harus divalidasi agar model tersebut dapat dikatakan representatif dan akurat. Validasi dilakukan dengan membandingkan data hidrostatik pada masing-masing struktur terapung. Yaitu kapal Tanker 150.000 DWT dan CALM Buoy Tuban milik PT. Pertamina melalui perbandingan antara hasil kalkulasi hidrostatik yang dilakukan dengan *Software Hydrostar V7.5* dan *Maxsurf V8i*.

Berikut tabel validasi kapal Tanker dan Buoy:

Tabel 4.3 Validasi Kapal Tanker 150.000 DWT

Perbandingan	Satuan	Model		Koreksi (%)
		Maxsurf	HydroSTAR	
Displacement	ton	181685	182327	0.353
Water Plan Area	m ²	11548.1	11553	0.042
LOA	m	272	272	0.000
LWL	m	268.9	268.7	0.074
LPP	m	262	262	0.000
B	m	47	47	0.000
T	m	17	17	0.000
LCB	m	133.634	133.45	0.138
CB	m	0.825	0.829	0.429
KB	m	8.841	8.8	0.464
Keel to Metacenter Transversal (KMT)	meter	19.88	19.87	0.050
Keel to Metacenter Longitudinal (KML)	meter	344.707	347.5	0.810
Buoy to Metacenter Transversal (BMT)	meter	11.03	11.07	0.363
Buoy to Metacenter Longitudinal (BML)	meter	335.867	338.7	0.843

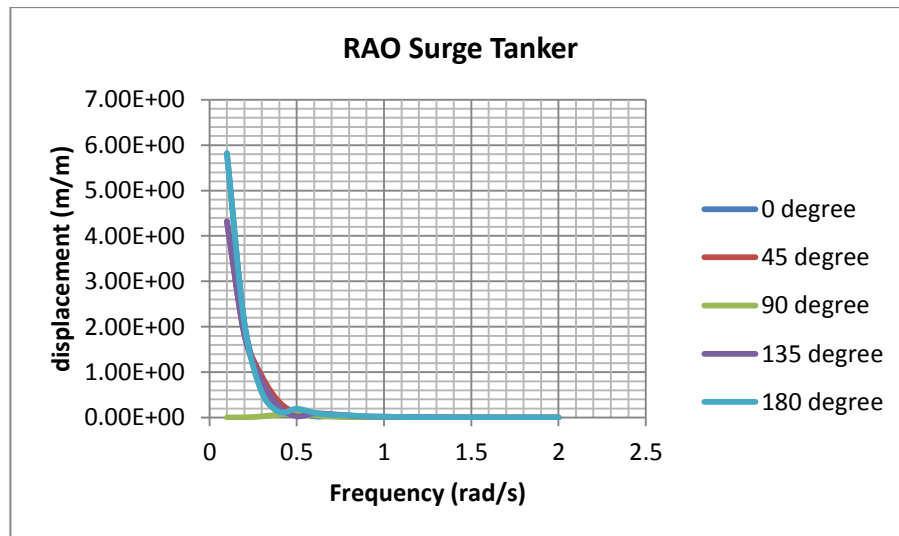
Tabel 4.4 Validasi CALM Buoy Tuban

Perbandingan	Satuan	Model		Koreksi (%)
		Maxsurf	HydroSTAR	
Displacement	ton	346.8	345.7	0.317
Water Plan Area	m ²	94.65	94.42	0.243
Depth	m	4.5	4.5	0.000
Diameter	m	268.9	268.7	0.074
KB	m	1.59	1.6	0.629
Keel to Metacenter Transversal (KMT)	meter	3.79	3.79	0.000
Keel to Metacenter Longitudinal (KML)	meter	3.8	3.8	0.000
Buoy to Metacenter Transversal (BMT)	meter	2.2	2.19	0.455
Buoy to Metacenter Longitudinal (BML)	meter	2.21	2.2	0.452

4.2 Response Amplitude Operator (RAO)

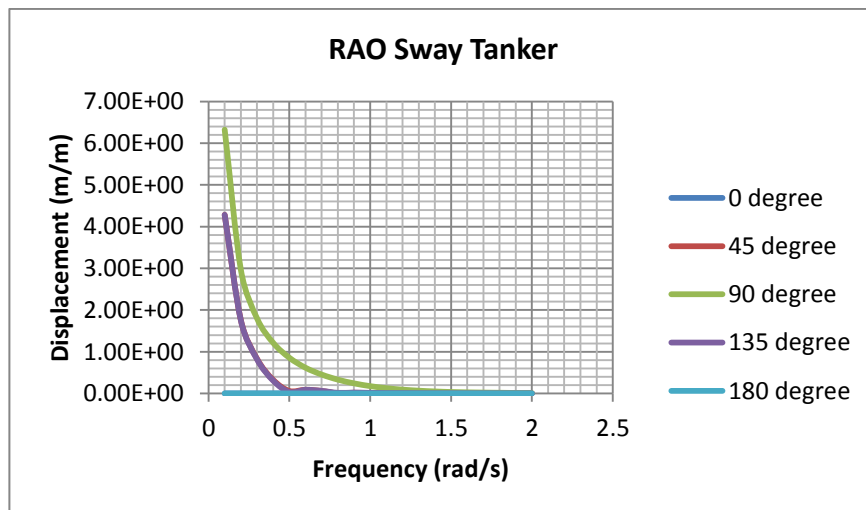
Sebelum beranjak kepada analisis struktur pada kondisi tertambat hingga perhitungan umur kelelahan pada *Software* Ariane V.8, perlu dilakukan analisa RAO dalam kondisi free floating baik pada Kapal Tanker maupun pada CALM Buoy Tuban untuk mengetahui karakteristik gerak pada masing-masing sekaligus untuk mengetahui tingkat kewajaran dalam pemodelan geometris kedua struktur tersebut. Dengan *input* berupa frekuensi gelombang dari 0 rad/s hingga 2,0 rad/s dan arah datang gelombang yaitu dari sudut 0 derajat hingga 180 derajat

Berikut grafik Response Amplitude Operator pada masing-masing struktur:



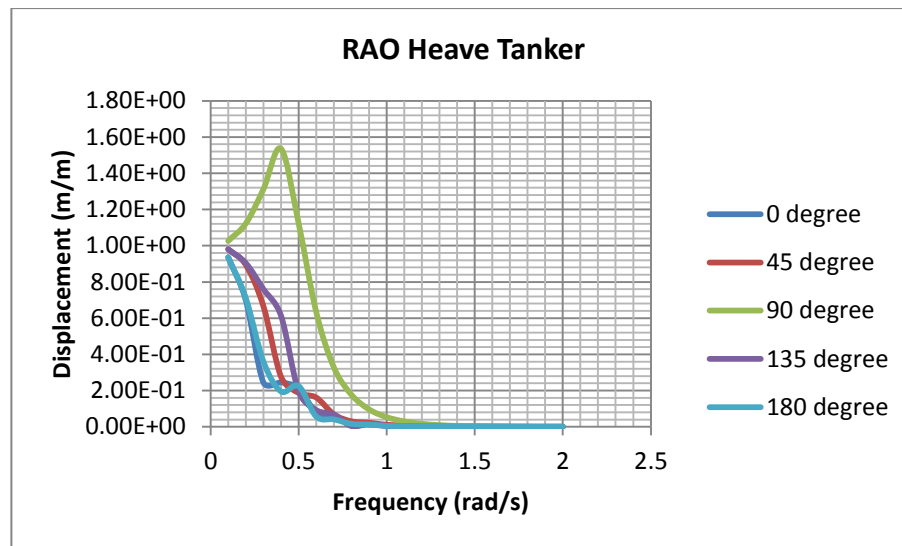
Gambar 4.3 Gerakan Surge Kapal Tanker

Pada gambar diatas, terlihat dengan jelas bahwa gerakan Surge kapal pada gelombang reguler berfrekuensi rendah menghasilkan displacement (respon perpindahan) yang cukup besar terutama pada Following sea (180 derajat) hingga mendekati 6 m/m, sedangkan pada gelombang arah quartering sea (135 derajat) mencapai displacement mendekati 4,5 m/m.



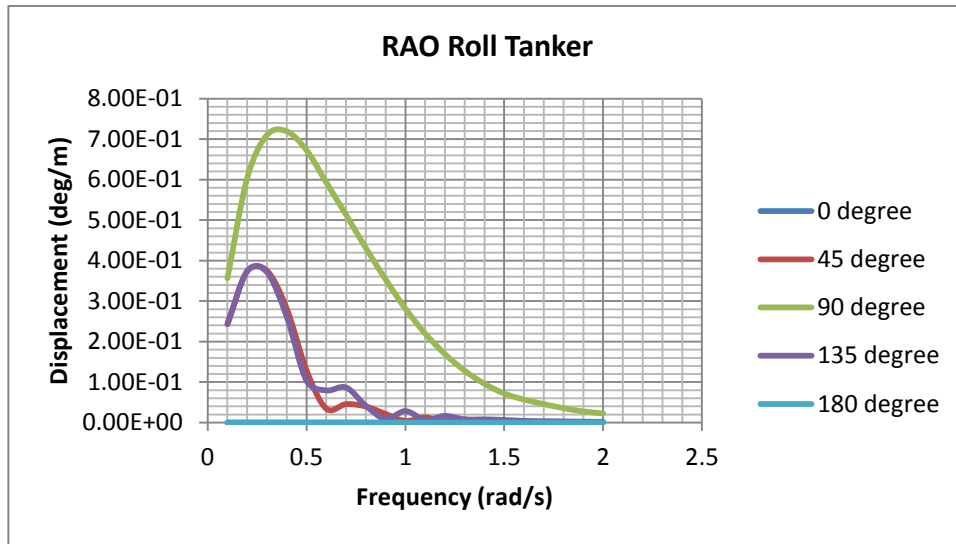
Gambar 4.4 Gerakan Sway Kapal Tanker

Gerakan sway kapal memiliki karakteristik yang bersimpangan dengan gerakan surge pada grafik sebelumnya. Pada grafik ini gelombang Beam Sea (90 derajat) memberikan perpindahan respon yang signifikan terutama pada gelombang frekuensi rendah yang mendekati 6,5 m/m. Sedangkan pada gelombang quartering sea (135 derajat) memiliki besar respon yang sama dengan respon surge sebelumnya.



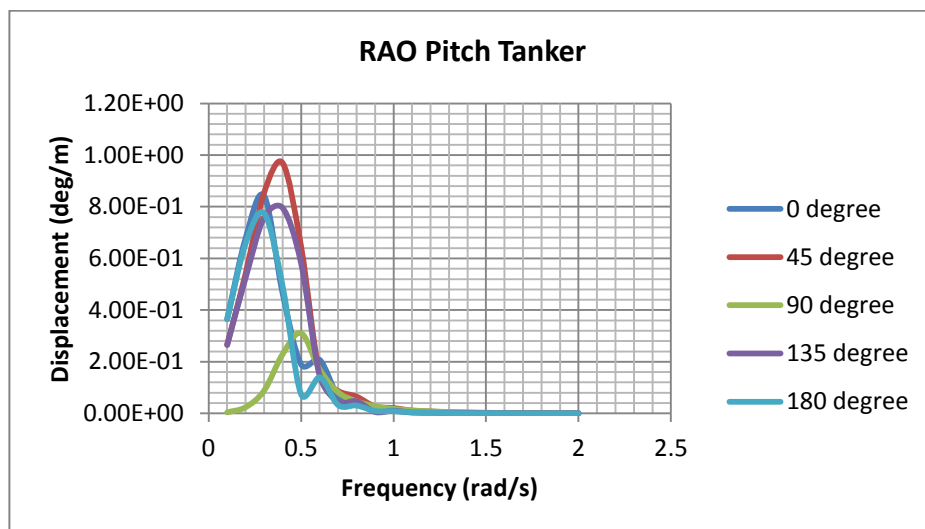
Gambar 4.5 Gerakan Heave Kapal Tanker

Pada grafik heave diatas, respon perpindahan terbesar terdapat pada gelombang beam sea (90 derajat) yang mendekati 1,6 m/m pada frekuensi 0,4 rad/s . setelah itu respon heave kapal berangsur turun seiring dengan naiknya frekuensi yang diberikan hingga 2 rad/s.



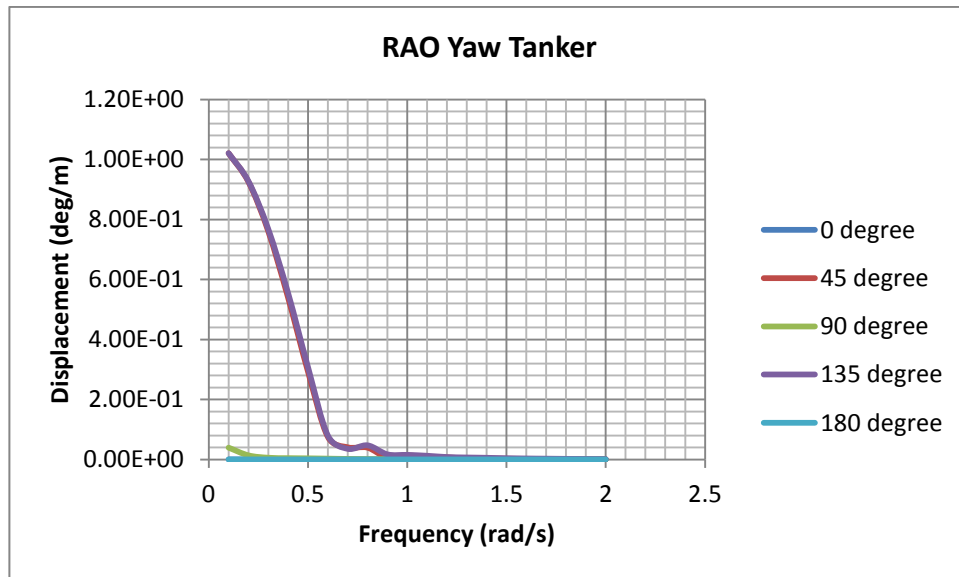
Gambar 4.6 Gerakan Roll Kapal Tanker

Grafik RAO Roll kapal tanker memiliki puncak respons pada gelombang frekuensi 0,4 rad/s oleh gelombang beam sea (90 derajat) yang pada seterusnya mengalami penurunan seiring naiknya besar frekuensi gelombang yang diberikan, gerakan roll ini memiliki kemiripan karakteristik terhadap gerakan Heave sebelumnya.



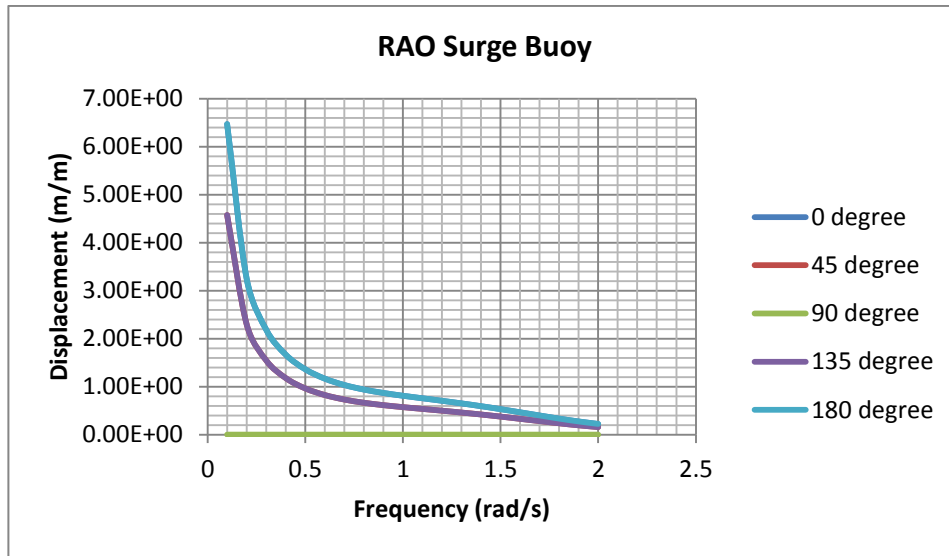
Gambar 4.7 Gerakan Pitch Kapal Tanker

Gerakan Pitch kapal memiliki puncak gerakan pada gelombang 0,4 rad/s yang disebabkan oleh gelombang Quartering Sea (45 Derajat) yang mendekati 1 derajat/meter kemudian gerakan tersebut menurun drastis pada frekuensi 0,6 rad/s dan menurun pada kenaikan frekuensi seterusnya.

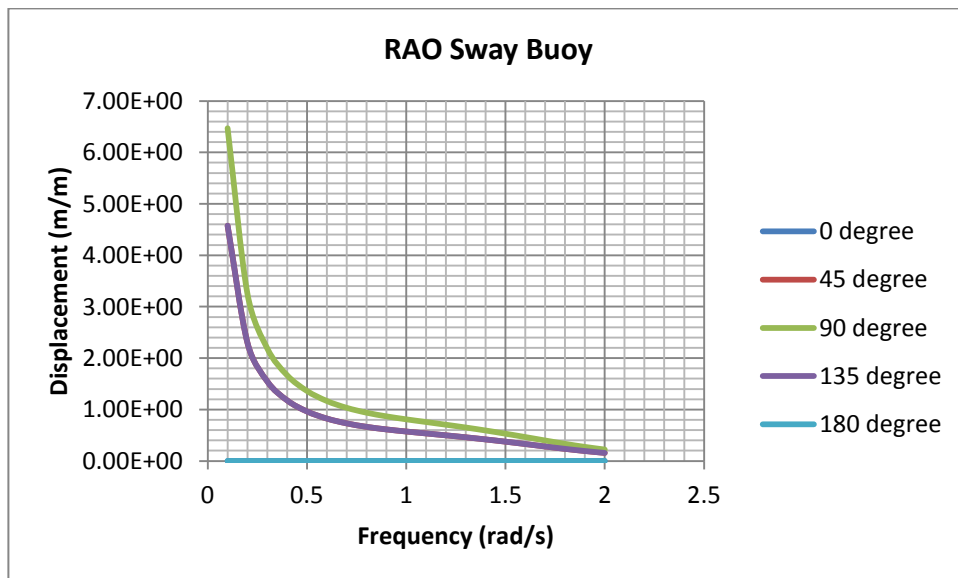


Gambar 4.8 Gerakan Yaw Kapal Tanker

Dari grafik diatas, terlihat hanya gelombang Quartering Sea (45 dan 135 derajat) yang memberikan respon berarti terhadap gerakan Yaw. Respon tersebut mengalami puncak melebihi 1 m/m pada frekuensi 0,1 rad/s lalu menurun hingga mendekati nol pada frekuensi 0,6 rad/



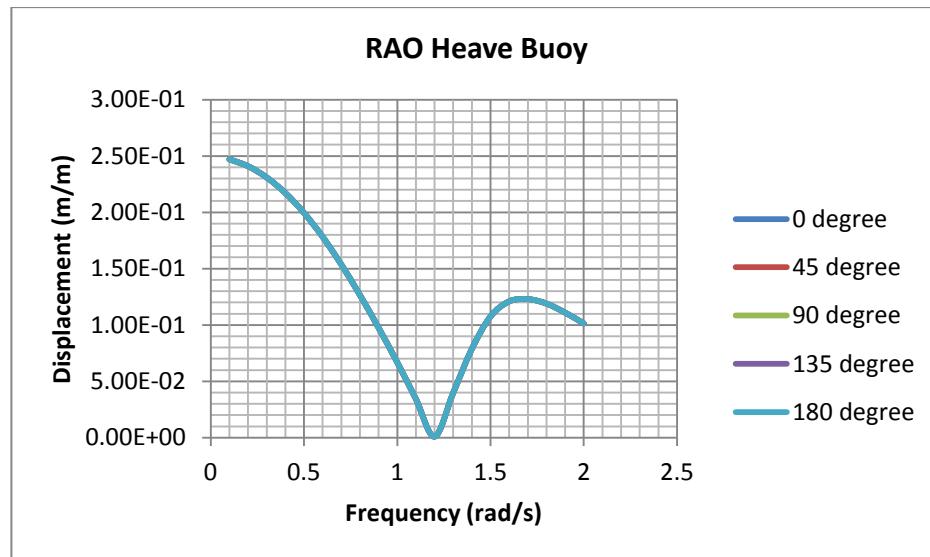
(a)



(b)

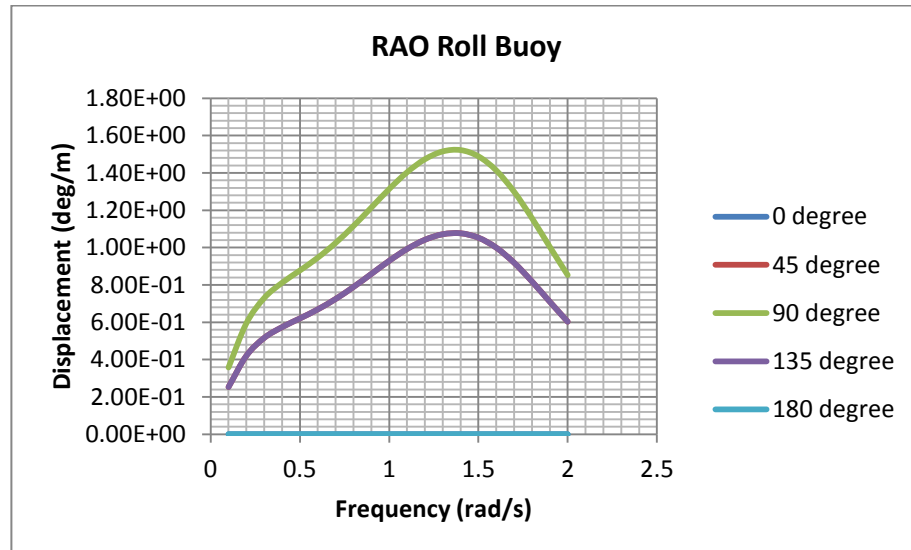
Gambar 4.9 Gerakan Surge (a) dan Sway (b) CALM Buoy

Dari Grafik respons diatas, Surge Buoy memiliki perpindahan puncak pada frekuensi 0,1 rad/s yang mencapai 1 meter lalu turun secara perlahan hingga mendekati 0,2 m/m pada frekuensi 2 rad/s. Karena Buoy yang berbentuk silindris simetris, maka respon gerak surge mempunyai karakteristik yang sama dengan respon gerak Sway.

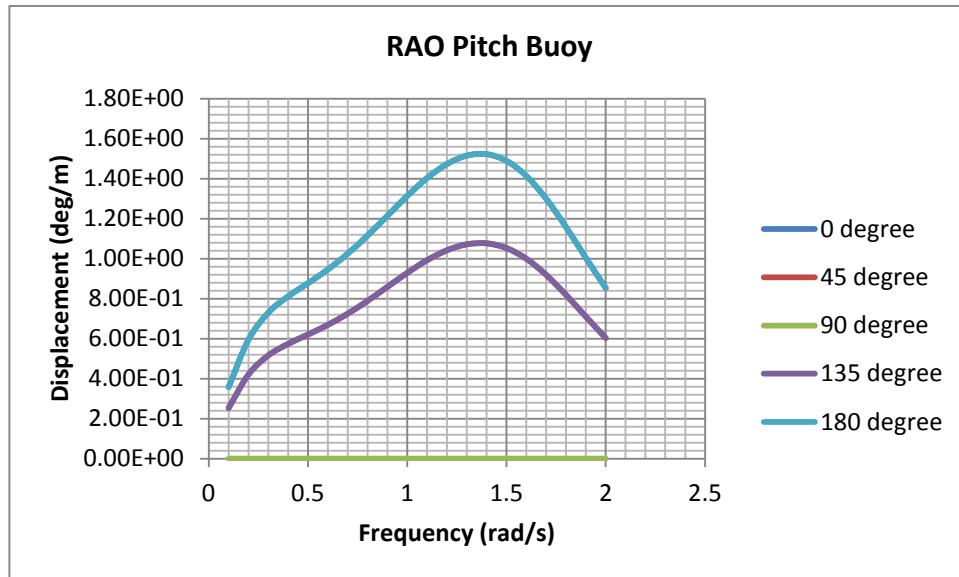


Gambar 4.10 Gerakan Heave CALM Buoy

Grafik RAO gerakan Heave pada Buoy mencapai perpindahan puncak pada 0.1 rad/s yang mendekati 0.25 meter lalu turun hingga mendekati nol pada frekuensi 1,2 rad/s dan setelahnya perlahan kembali naik.



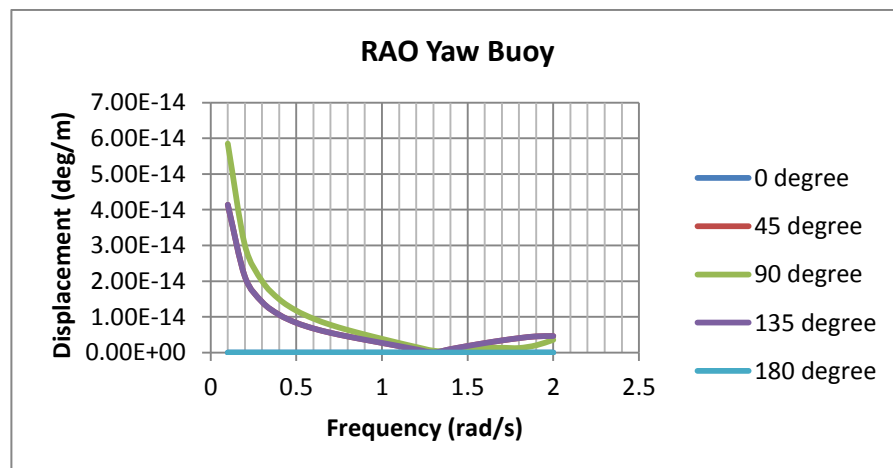
(a)



(b)

Gambar 4.11 Gerakan Roll (a) dan Pitch (b) CALM Buoy

Pada grafik diatas, terlihat gerakan Pitch dan Roll perlahan semakin meningkat dari frekuensi terendah pada 0,1 rad/s hingga mencapai titik puncaknya pada gelombang frekuensi 1,4 rad/s yang mendekati 1,6 m/m hingga selanjutnya mengalami penurunan perlahan sampai 0,85 m/m pada frekuensi 2 rad/s. Karena bentuk buoy yang silindris simetris, maka gerakan Pitch dan Roll memiliki karakteristik gerak yang sama.



Gambar 4.12 Gerakan Yaw CALM Buoy

Respon struktur buoy pada gerakan yaw memiliki besar respon yang terlampau kecil seperti terlihat pada grafik, hal ini dikarenakan bentuk geometris buoy yang silindris simetris.

4.3 Pemodelan Menggunakan ARIANE 8

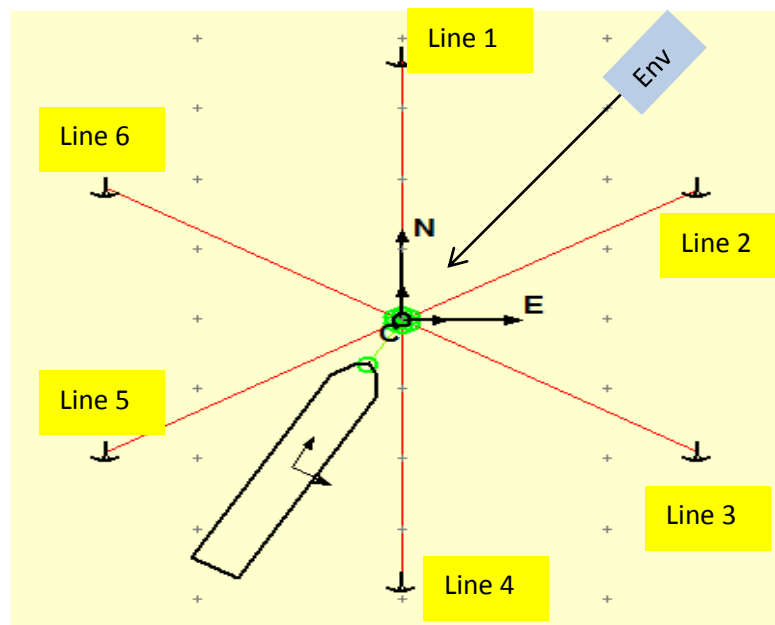
Pada pemodelan dengan menggunakan *software* ARIANE 8 hal yang pertama kali dilakukan ialah memasukkan data *Vessel* yaitu Tanker 150.000DWT dan Buoy beserta data Hidrodinamisnya seperti RAO, Added Mass, Damping, Quadratic Transfer Function (QTF), Momen Inersia, Jari-Jari Girasi, dan *Hydrostatic Stiffness*. Data-data hidrodinamis tersebut sudah secara langsung di ekspor dari hasil keluaran Hydrostar V.7.5 pada pemodelan di subbab sebelumnya. Setelah memasukkan data *vesssel*, maka masukkan data jenis tali (*Anchor Leg*) yang akan dipasang. Data tali yang dimasukkan ialah sebagai berikut:

Tabel 4.5 Data Anchor Leg CALM Buoy Tuban

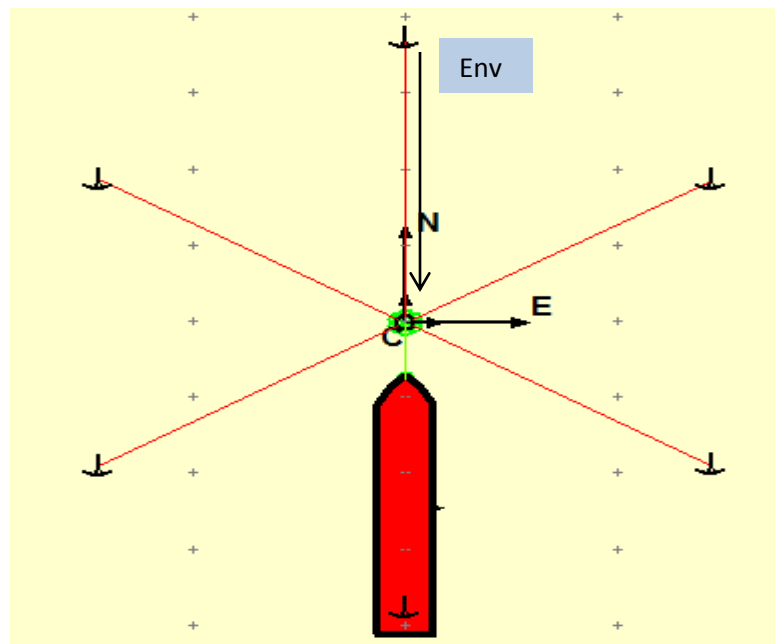
Number of Legs	6
Anchoring Pattern	Even Spacing (60°)
Paid-out Length	300 m
Pretension Angle	55°
Chain Diameter	3 Inch
Chain Type	R3 Studlink
Minimum Breaking Load	4903 KN
Distance to Anchor	293 m

(Sumber : PT. Pertamina)

Langkah selanjutnya ialah membuat arrangement posisi kapal Tanker, Buoy, beserta *Anchor* nya. Pada analisa tali tambat dengan kondisi yang *Weathervaning* maka terdapat dua posisi yang dianalisa, yaitu posisi *In Line* dan *Between Line* dengan arah beban lingkungan berhadapan tepat dengan muka kapal (Head Sea). Berikut gambar posisi *In Line* dan *Between Line*



Gambar 4.13 Posisi Between Line ARIANE8



Gambar 4.14 Posisi In Line ARIANE8

4.4 Analisa Umur Kelelahan CALM Buoy Tuban

Pada analisa ini, dilakukan simulasi ranah waktu (*Time Domain Simulation*) dengan rentang durasi sebesar 3 Jam (10800 sekon). Adapun simulasi ini memperhitungkan pengaruh ketebalan korosi terhadap umur kelelahan. Dengan asumsi CALM Buoy Tuban yang telah beroperasi selama 20 Tahun. Terdapat tiga kasus laju korosi yang dipertimbangkan. Yakni, ketebalan korosi 4 mm yang akibat laju korosi 0,2 mm/tahun berdasarkan data lapangan, ketebalan korosi 8 mm akibat laju korosi 0,4 mm/tahun berdasarkan laju korosi rata-rata perairan laut jawa di Indonesia , dan 14 mm akibat laju korosi 0,7 mm/tahun dengan pertimbangan kondisi ekstrim. Berikut hasil analisa umur kelelahan pada posisi *In Line* dan *Between Line* dengan menggunakan *Time Domain Simulation* pada *software* ARIANE 8:

Tabel 4.6 Hasil Analisis Umur Kelelahan pada posisi In Line (*Annual Damage*)

Corrosion Rate	Corrosion Thickness	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
0 mm/year	0 mm	0.0029916	0.00186	0.00143	0.00198	0.00143	0.00185684
0,2 mm/year	4 mm	0.0038947	0.00255	0.001945	0.00249	0.001945	0.00255084
0,4 mm/year	8 mm	0.004162	0.0033	0.002354	0.002096	0.002354	0.00330354
0,7 mm/year	14 mm	0.0089092	0.0059	0.004424	0.004678	0.004424	0.004854

Tabel 4.7 Hasil Analisa Umur Kelelahan pada posisi Between Line (*Annual Damage*)

Corrosion Rate	Corrosion Thickness	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
0 mm/year	Initial	0.00188104	0.00201952	0.001157	0.00129	0.001313	0.001054
0,2 mm/year	4 mm	0.00259722	0.00278504	0.001564	0.00177	0.001798	0.0014246
0,4 mm/year	8 mm	0.00356373	0.00368745	0.002026	0.00235	0.002477	0.0020502
0,7 mm/year	14 mm	0.00589956	0.00609486	0.003404	0.00392	0.004123	0.0034432

Tabel diatas merupakan hasil analisa kelelahan dengan *Output* berupa *Annual Damage* untuk mendapatkan umur kelelahan dalam satuan tahun (*years*) ialah dengan

memasukkan persamaan $1/D$ pada tiap *Damage* tersebut. Maka hasil analisa kelelahan dalam satuan tahun terdapat pada tabel dibawah

Tabel 4.8 Hasil Analisa Umur Kelelahan pada posisi In Line (Years)

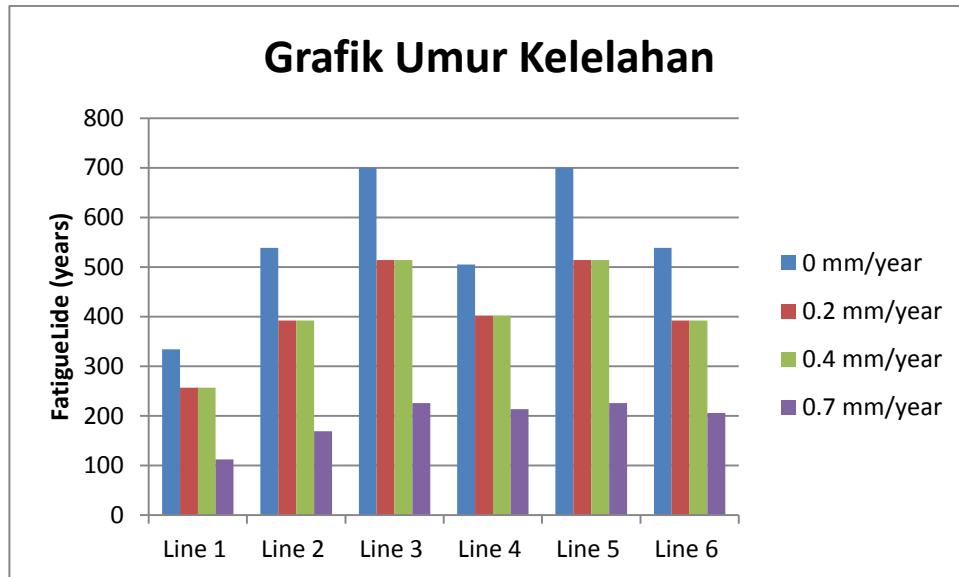
Corrosion Rate (mm/year)	Corrosion Thickness (mm)	Line 1 (years)	Line 2 (years)	Line 3 (years)	Line 4 (years)	Line 5 (years)	Line 6 (years)
0	0 mm	334	539	700	505	700	539
0.2	4 mm	257	392	514	402	514	392
0.4	8 mm	240	303	425	477	425	303
0.7	14 mm	112	169	226	214	226	206

Tabel 4.9 Hasil Analisa Umur Kelelahan pada posisi Between Line (Years)

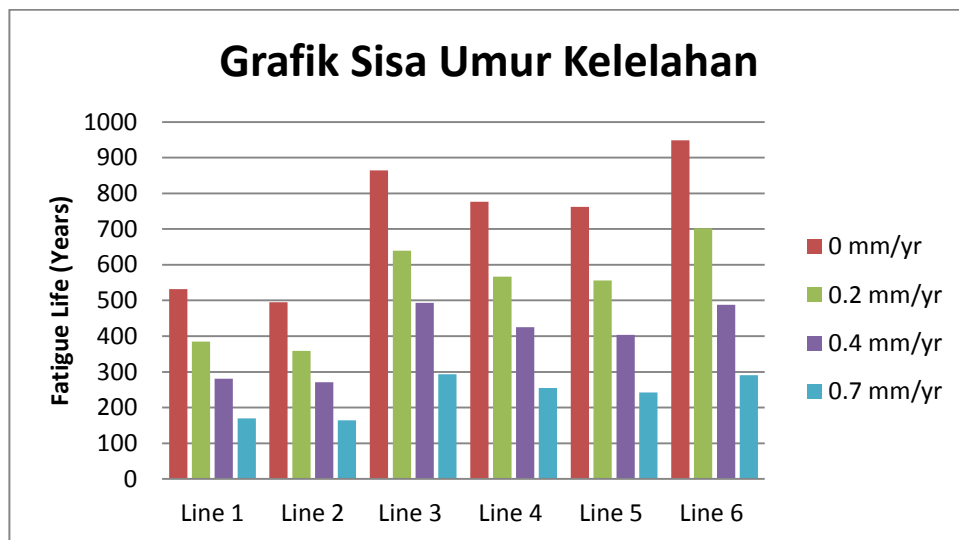
Corrosion Rate (mm/year)	Corrosion Thickness (mm)	Line 1 (years)	Line 2 (years)	Line 3 (years)	Line 4 (years)	Line 5 (years)	Line 6 (years)
0	0	532	495	865	777	762	949
0.2	4	385	359	639	567	556	702
0.4	8	281	271	493	425	404	488
0.7	14	170	164	294	255	243	290

Setelah mendapatkan umur kelelahan dalam satuan Tahun (*Years*) terlihat bahwa umur kelelahan terkecil sebesar 112 tahun pada kondisi *In Line* dan 164 tahun pada kondisi *Between Line*. maka dalam kasus perpanjangan umur operasi di penelitian ini ialah kita harus meninjau kelayakan umur dengan *Safety Factor for Fatigue Life*. Besaran *safety factor* (SF) yang dipakai ialah 10 dalam artian umur desain harus memenuhi kriteria 10 kali lipat dari umur operasi. Dengan keberjalanan operasi mencapai 20 tahun dikalikan SF 10 maka kriteria umur *Anchor Leg* harus memenuhi sebesar 200 tahun.

Berikut kelayakan tali digambarkan pada grafik di bawah ini:

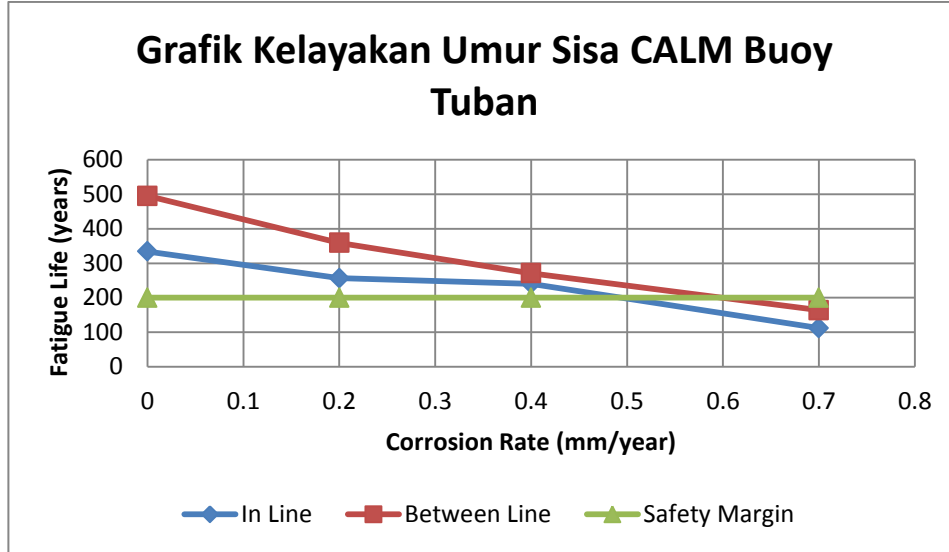


Gambar 4.15 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan per Laju Korosi (In Line)



Gambar 4.16 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan per Laju Korosi (Between Line)

Dari kedua grafik diatas bahwa umur kelelahan telah tidak memenuhi kriteria umur kelelahan yang ditetapkan yaitu 200 tahun umur desain. Hal ini terjadi pada laju korosi 0,7 mm/tahun. Untuk lebih jelasnya kelayakan umur sisa CALM Buoy Tuban yang telah berjalan selama 20 tahun dapat dijelaskan pada tabel dibawah:



Gambar 4.17 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan per Laju Korosi

Melalui grafik kelayakan umur diatas, terlihat bahwa garis umur sisa CALM Buoy Tuban yang memotong garis *Safety Margin* pada laju korosi 0,5 mm/tahun pada kondisi *In Line* dan 0,6 mm/tahun pada kondisi *Between Line*.

4.4.1 Pengaruh Penggantian Tali Terhadap Umur Kelelahan

Melihat grafik diatas, maka jelas bahwa umur kelelahan CALM Buoy Tuban sudah tidak memenuhi kriteria keamanan yakni ketika garis umur kelelahan melampaui *Safety Margin* saat laju korosi sekitar 0,5 mm/tahun pada posisi *In Line* dan 0,6 mm/tahun pada posisi *Between Line*. Dalam penelitian perpanjangan umur operasi ini, dilakukan penggantian tali dengan dua kasus, yaitu penggantian pada satu tali yaitu Line 1 dan penggantian pada 2 tali sekaligus yaitu Line 1 dan Line 2 yang memiliki umur kelelahan terkecil. Penggantian dilakukan dengan tali yang sama dalam artian kondisi tali dikembalikan pada kondisi awal tanpa korosi.

4.4.1.1 Umur Kelelahan Setelah Penggantian Line 1

Dengan mengganti Line 1 maka umur kelelahan pada tali tersebut kembali berubah menjadi umur awal desain tanpa adanya ketebalan korosi (*Corrosion*

Thickness) yakni sebesar 334 Tahun pada setiap laju korosinya. Berikut hasil perubahan umur kelelahan CALM Buoy Tuban setelah penggantian Line 1:

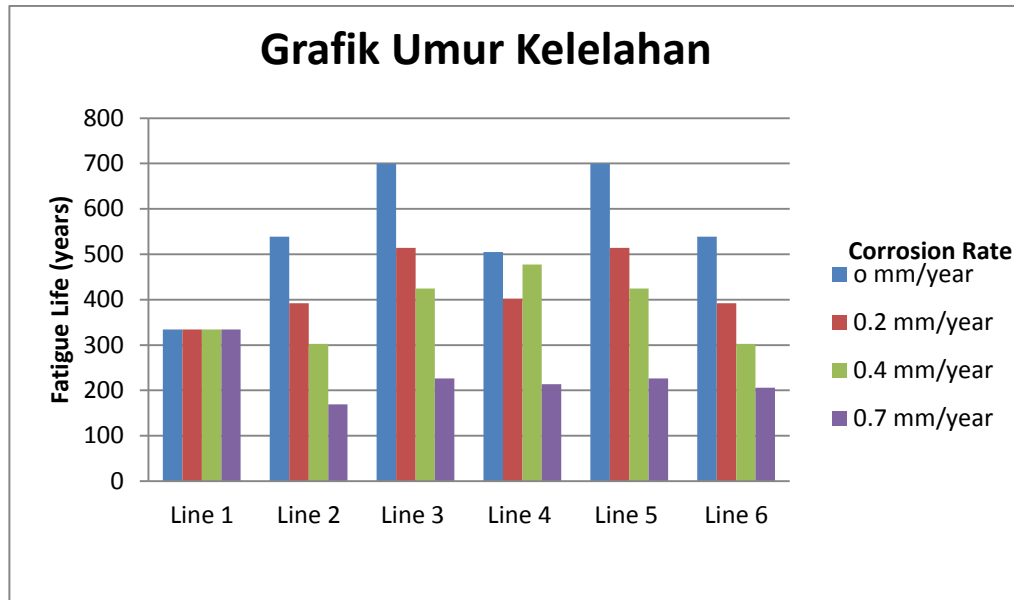
Tabel 4.10 Umur Kelelahan Pasca Penggantian Line 1 (*In Line*)

Corrosion Rate (mm/year)	Corrosion Thickness (mm)	Line 1 (years)	Line 2 (years)	Line 3 (years)	Line 4 (years)	Line 5 (years)	Line 6 (years)
0	0	334	539	700	505	700	539
0.2	4	334	392	514	402	514	392
0.4	8	334	303	425	477	425	303
0.7	14	334	169	226	214	226	206

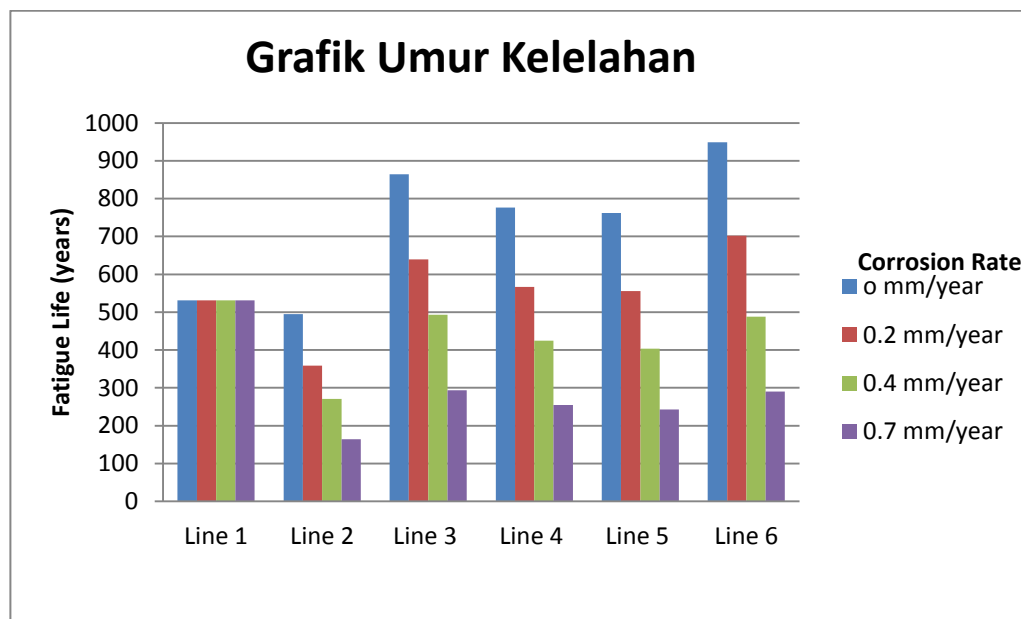
Tabel 4.11 Umur Kelelahan Pasca Penggantian Line 1 (*Between Line*)

Corrosion Rate (mm/year)	Corrosion Thickness (mm)	Line 1 (years)	Line 2 (years)	Line 3 (years)	Line 4 (years)	Line 5 (years)	Line 6 (years)
0	0	532	495	865	777	762	949
0.2	4	532	359	639	567	556	702
0.4	8	532	271	493	425	404	488
0.7	14	532	164	294	255	243	290

Setelah penggantian Line 1, Umur Kelelahan CALM Buoy Tuban berubah namun masih belum memenuhi kriteria keselamatan karena dapat dilihat pada tabel diatas bahwa Line 2 pada laju korosi 0,7 mm/tahun memiliki umur 164 tahun dimana umur tersebut dibawah 200 tahun kriteria yang sudah ditetapkan. Perubahan umur kelelahan sistem CALM Buoy Tuban berdasarkan umur terkecil dapat dilihat pada grafik dibawah:

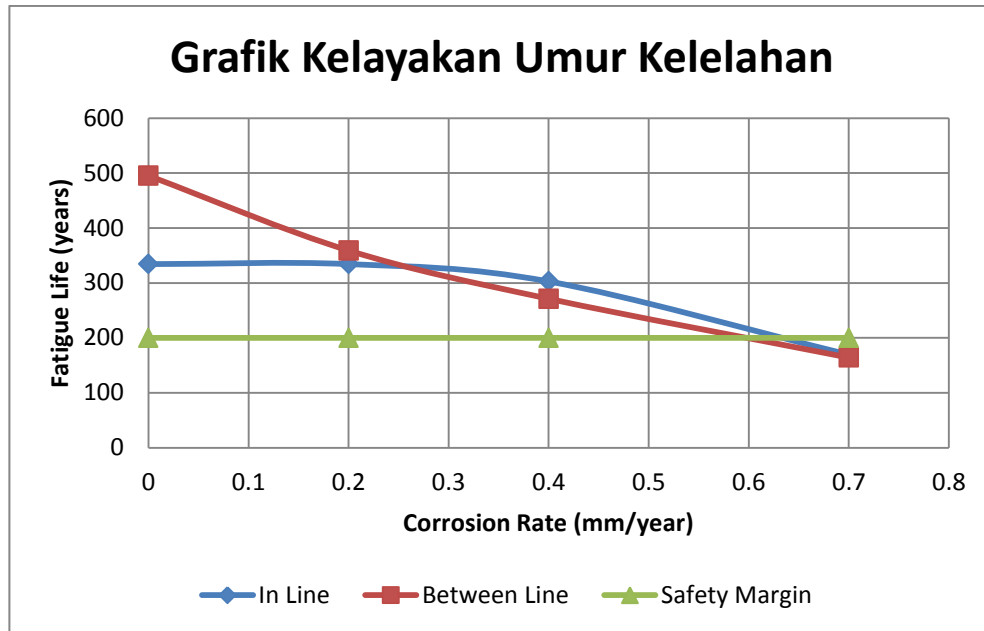


Gambar 4.18 Grafik Umur Kelelahan setelah Penggantian Line 1(In Line)



Gambar 4.19 Grafik Umur Kelelahan setelah Penggantian Line 1(Between Line)

Dari grafik diatas nampak bahwa Line 2 masih tidak memenuhi kriteria yakni 200 tahun pada laju korosi 0,7 mm/tahun. Untuk info lebih detil berdasar umur kelelahan terkecil dapat dilihat pada grafik di bawah:



Gambar 4.20 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan setelah Penggantian Line 1

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa garis Umur kelelahan masih memotong *Safety Margin* 200 tahun yakni pada laju korosi 0,6 mm/tahun pada posisi *between line* dan 0,65 mm/tahun pada posisi Inline. Sehingga masih perlu dilakukan penggantian pada tali lain.

4.4.1.2 Umur Kelelahan Setelah Penggantian Line 1 dan Line 2

Menyikapi kriteria umur kelelahan yang masih belum terpenuhi, maka dilakukan penggantian pada tali yang memiliki umur terkecil yaitu Line 2. Serupa dengan penggantian Line 1, Line 2 diganti dengan tali spesifikasi yang sama dengan kata lain umur kelelahan pada Line 2 kembali seperti saat awal desain (*Initial Design*) tanpa adanya ketebalan korosi pada tali tersebut. Berikut hasil perubahan umur kelelahan CALM Buoy Tuban setelah penggantian Line 1 dan Line 2:

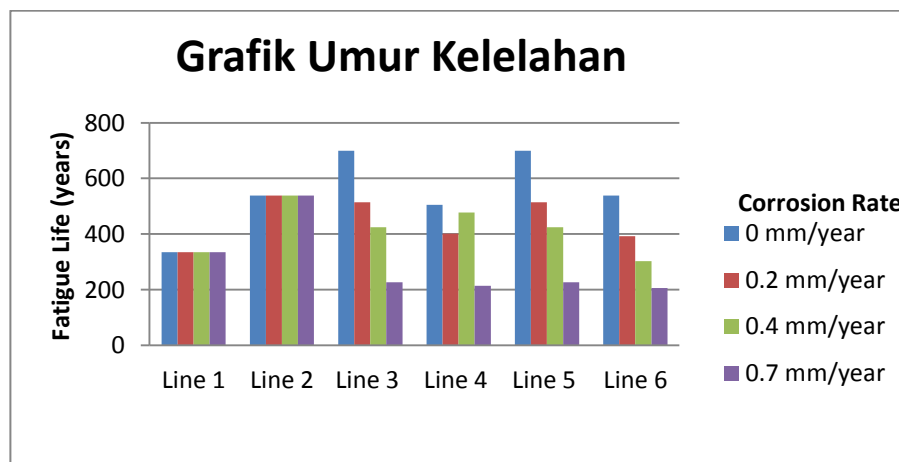
Tabel 4.12 Umur Kelelahan Pasca Penggantian Line 1 & Line 2 (*In Line*)

Corrosion Rate (mm/year)	Corrosion Thickness (mm)	Line 1 (years)	Line 2 (years)	Line 3 (years)	Line 4 (years)	Line 5 (years)	Line 6 (years)
0	0	334	539	700	505	700	539
0.2	4	334	539	514	402	514	392
0.4	8	334	539	425	477	425	303
0.7	14	334	539	226	214	226	206

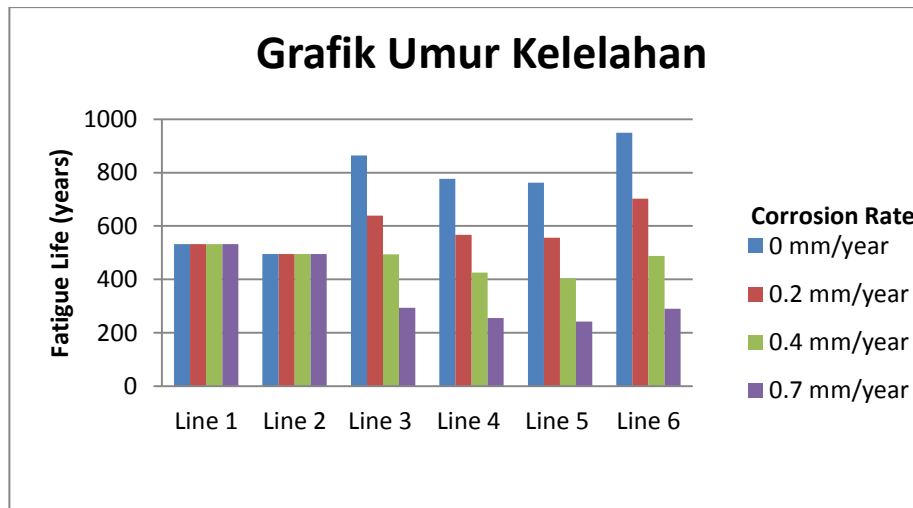
Tabel 4.13 Umur Kelelahan Pasca Penggantian Line 1 & Line 2 (*Between Line*)

Corrosion Rate (mm/year)	Corrosion Thickness (mm)	Line 1 (years)	Line 2 (years)	Line 3 (years)	Line 4 (years)	Line 5 (years)	Line 6 (years)
0	0	532	495	865	777	762	949
0.2	4	532	495	639	567	556	702
0.4	8	532	495	493	425	404	488
0.7	14	532	495	294	255	243	290

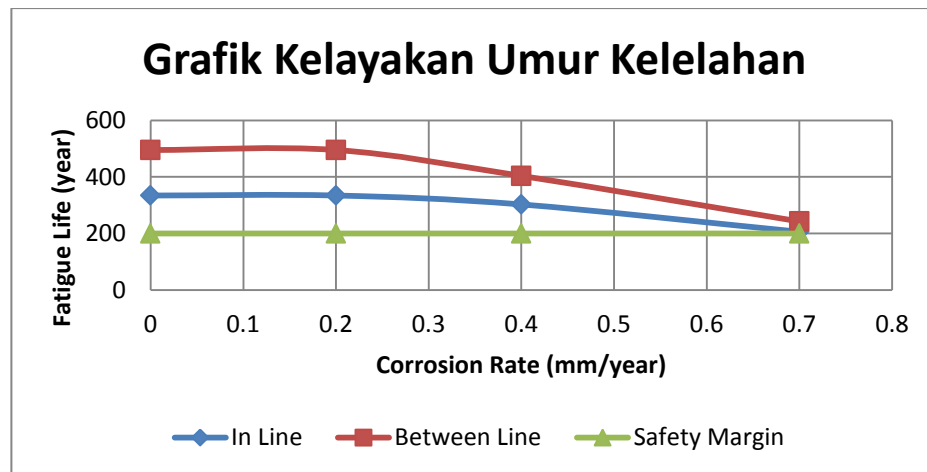
Berdasarkan tabel diatas, terlihat bahwa nilai kelelahan terkecil yakni pada Line 4 dan Line 5 sudah mencukupi *Safety Margin* dari umur desain dengan demikian tidak perlu lagi mengadakan penggantian tali. Perubahan Umur Sistem CALM Buoy Tuban akibat penggantian Line 1 dan Line 2 dapat dilihat pada grafik dibawah:



Gambar 4.21 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan setelah Penggantian Line 1 dan Line 2 (*In Line*)



Gambar 4.22 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan setelah Penggantian Line 1 dan Line 2 (Between Line)



Gambar 4.23 Grafik Kelayakan Umur Kelelahan setelah penggantian Line1 & Line2

Dari grafik diatas terlihat bahwa garis umur kelelahan baik pada kondisi *In Line* maupun *Between Line* tidak memotong garis *Safety Margin*. Hal ini menyimpulkan bahwa umur kelelahan sistem CALM Buoy Tuban telah memenuhi kriteria keamanan yang telah ditentukan setelah penggantian Line 1 dan Line 2

dengan umur kelelahan terkecil sebesar 214 tahun pada kondisi *In Line* dan 243 tahun pada kondisi *Between Line* dalam laju korosi terekstrim yaitu 0,7 mm/tahun.

4.5 Analisa Keandalan CALM Buoy Tuban

Moda Kegagalan yang sudah ditulis pada Bab 2 dalam persamaan (2.25) lalu diadopsikan menjadi persamaan (2.26). persamaan tersebut dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$MK = K - B \dots\dots\dots(4.5.1)$$

dengan :

K = variabel kekuatan

B = variabel beban

Sedangkan persamaan moda kegagalan dengan memakai Remaining Fatigue Strength Check ialah sebagai berikut:

$$D_p \cdot \alpha + D_e \cdot FDF \cdot L \leq 1 \dots\dots\dots(4.5.2)$$

Dengan:

D_p = Damage yang terjadi dimasa lampau (yang sudah terjadi)

D_e = Damage yang diprediksi setelah perpanjangan umur operasi

α = Reduced Safety Factor

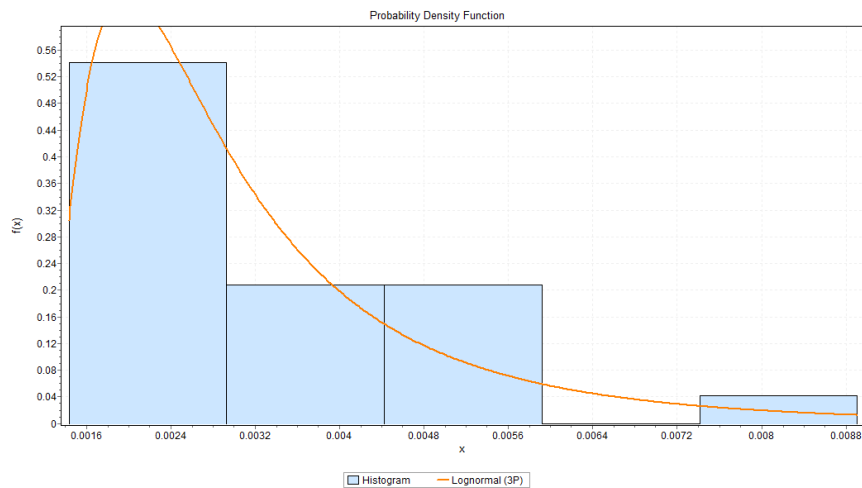
L = *Requested Life Extension* (Umur perpanjangan yang diinginkan)

FDF = *Safety Factor for Fatigue Life*

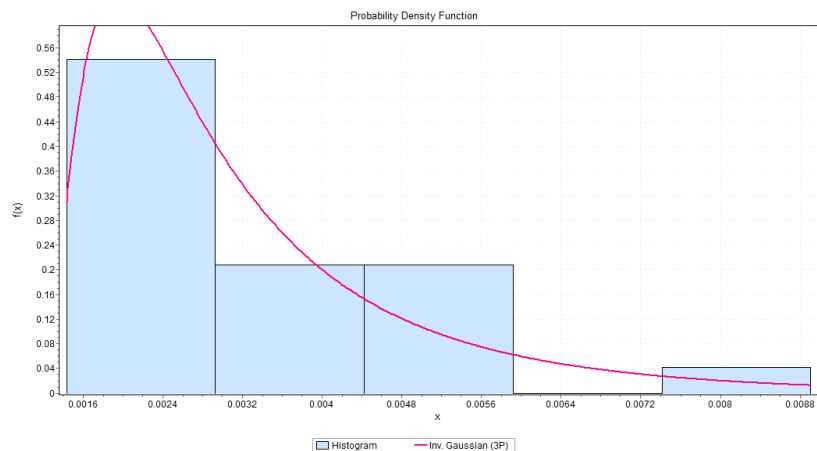
4.5.1 Penentuan Variabel Acak dan Parameter Statistik Acak

Dari persamaan moda kegagalan diatas dapat ditentukan bahwa variabel acaknya ialah Damage yang terjadi pada masa lampau (D_p) dan Damage yang diprediksi setelah perpanjangan umur operasi (D_e). Sedangkan dalam penentuan

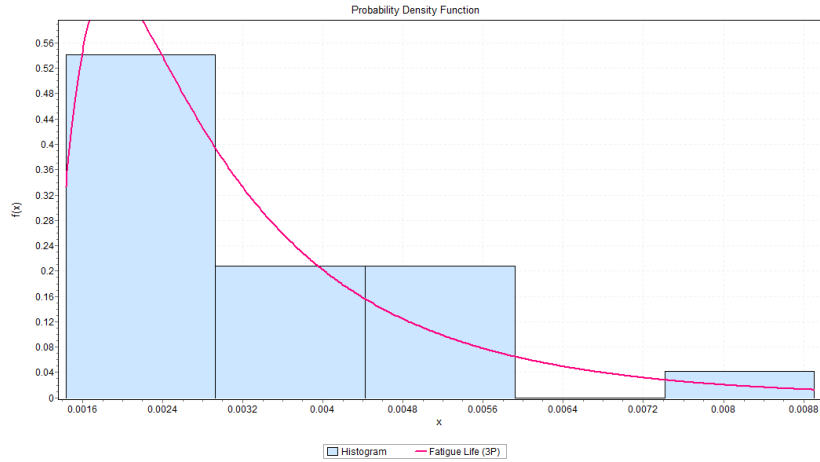
Safety Factor baik yang *reduced* maupun *Fatigue Life* dimasukkan sebesar 5 yang diperuntukkan untuk area-area yang sulit di-inspeksi. Untuk *L* ditentukan sebesar 20 tahun kedepan. Nilai Quartil 3 (D1/3) *Damage* dari seluruh Tali digunakan sebagai *Mean* untuk melakukan simulasi *Monte Carlo* . untuk mengeluarkan *Random Number Generator* (RNG) perlu diketahui pula jenis distribusi yang cocok dengan data sebaran *Accumulative Damage* yang didapatkan. Pada penelitian ini digunakan *Software* statistik yaitu EasyFit 5.5. berikut grafik *Fit Distribution* terhadap beberapa jenis distribusi yang mendekati:



(a)



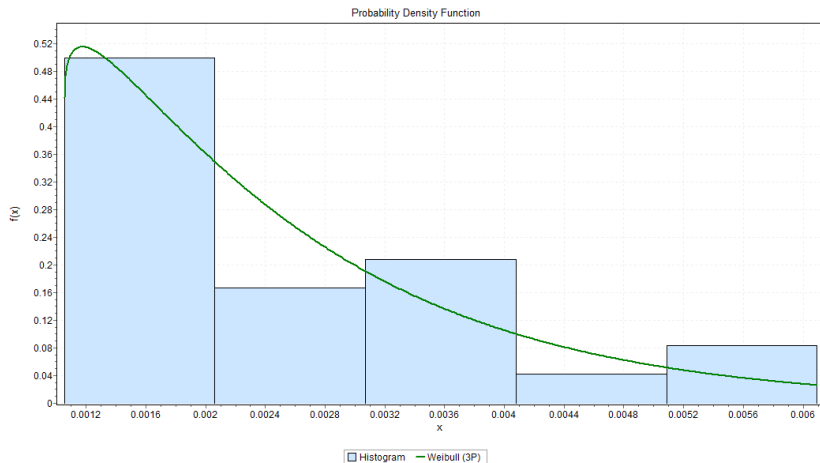
(b)



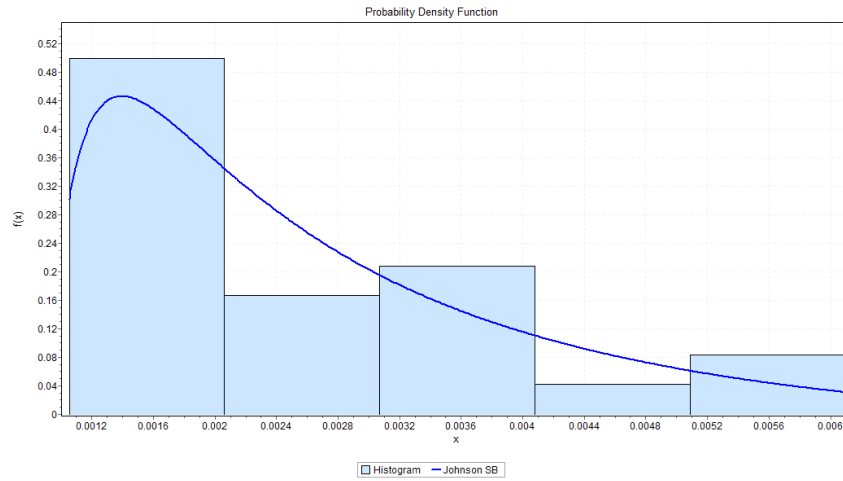
(c)

Gambar 4.24 grafik *fit distribution* Log-normal 3P (a), Inv. Gaussian (b), dan Fatigue Life (c) pada kondisi *In Line*

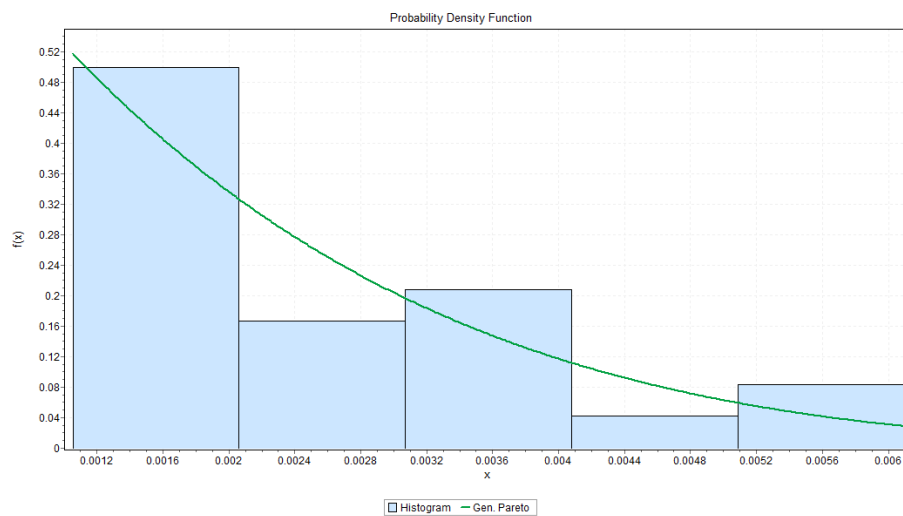
Pada dasarnya diperbolehkan memakai salah satu dari tiga jenis distribusi pada grafik diatas. Pada tugas akhir ini dipilih distribusi Log-Normal karena distribusi ini yang umum dikenal dan lebih sering digunakan. Berikut grafik *Fit Distribution* pada posisi *Between Line* :



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.25 Grafik *fit distribution* Weibull (a), Johnson SB (b), Gen Pareto (c) pada kondisi *Between Line*

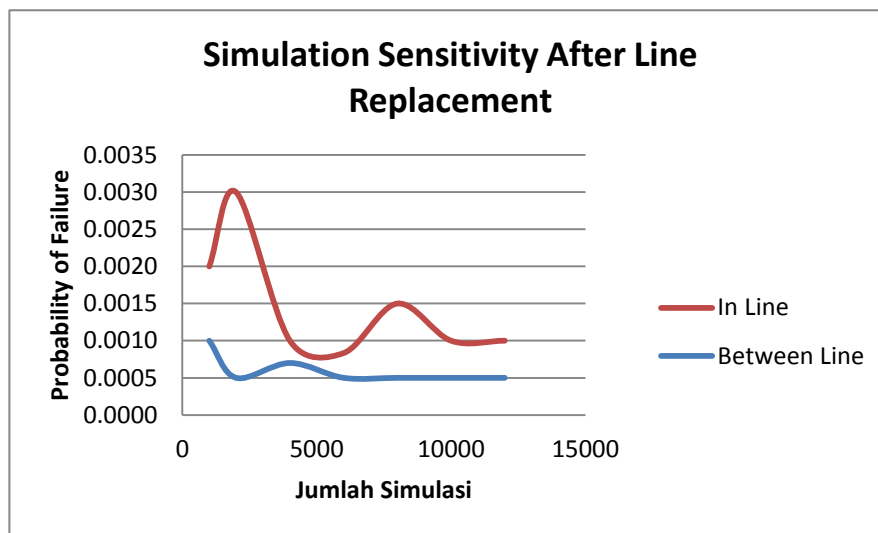
Dalam kondisi *Between Line*, diambil distribusi Weibull. Maka Parameter statistik yang dipakai untuk simulasi *Monte Carlo* disajikan dalam tabel di bawah.

Tabel 4.14 Parameter Statistik untuk Variabel Acak setelah penggantian tali

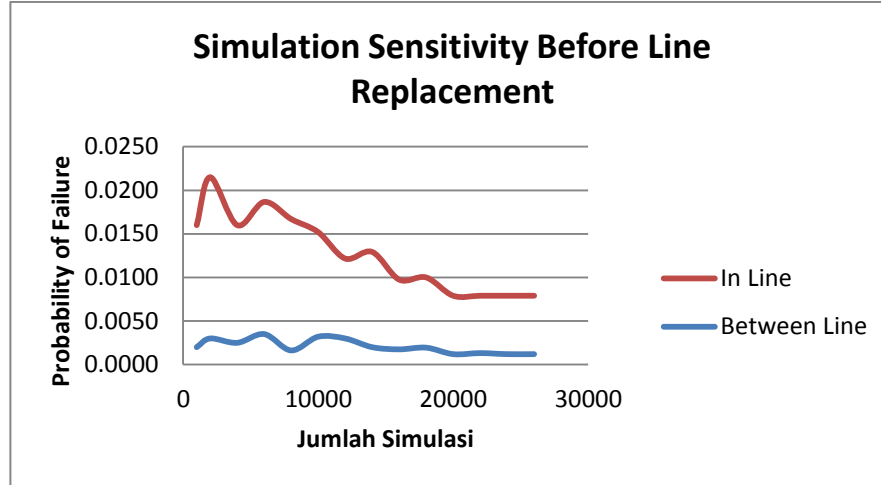
Arrangement	Parameter Statistik	Before Line Replacement	After Line Replacement	Jenis Distribusi
In Line	μ	0.004359	0.002646	Log Normal
	σ	0.00143	0.001027	
Between Line	μ	0.003534	0.002646	Weibull
	σ	0.00145	0.001027	

4.5.2 Simulasi Monte Carlo

Setelah diketahui parameter statistiknya, maka simulasi *monte carlo* dapat dilakukan. Jumlah variabel acak dalam simulasi terus ditingkatkan mulai dari 1000,2000,4000, hingga 12000 pada kondisi setelah penggantian tali dan untuk kondisi sebelum penggantian tali melakukan simulasi hingga 26000 simulasi. Hal ini ditujukan untuk mendapatkan jumlah peluang kegagalan yang cukup valid dan stabil . berikut hasil simulasi *Monte Carlo* pada masing-masing kondisi yaitu *In Line* dan *Between Line* sebelum dan sesudah penggantian tali tambat pada sistem CALM Buoy Tuban:



(a)



(b)

Gambar 4.26 Grafik Sensitivitas Simulasi pada kondisi sesudah (a) dan sebelum (b) penggantian tali tambat

Seperti yang terlihat pada grafik diatas bahwa peluang kegagalan setelah penggantian tali tambat mencapai kestabilan pada jumlah simulasi ke 6000 pada kondisi *Between line* dan 10.000 pada kondisi *In Line*

Adapun cara menghitung Peluang Kegagalan (*PoF*) seperti yang sudah dijelaskan pada Bab 2 persamaan (2.2.6.1) dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$Pg = n/N_K \dots\dots\dots(2.2.6.1)$$

Dengan :

- Pg = peluang gagal dari seluruh kejadian
- Nk = jumlah seluruh kejadian
- n = jumlah kejadian gagal

sehingga dengan memakai metode perhitungan diatas, didapat *Probability of Failure (POF)* dalam tabel dibawah:

Tabel 4.15 Peluang kegagalan sebelum penggantian tali tambat

Jumlah Simulasi	Between Line	In Line
1000	0.002	0.0160
2000	0.003	0.0215
4000	0.0025	0.0160
6000	0.0035	0.0187
8000	0.0016	0.0167
10000	0.0032	0.0152
12000	0.003	0.0122
14000	0.002	0.0129
16000	0.0018	0.0098
18000	0.0019	0.010
20000	0.0012	0.0079
22000	0.0013	0.0079
24000	0.0012	0.0079
26000	0.0012	0.0079

Tabel 4.16 Peluang kegagalan setelah penggantian tali tambat

Jumlah Simulasi	Between Line	In Line
1000	0.001	0.0020
2000	0.0005	0.0030
4000	0.0007	0.0010
6000	0.0005	0.0008
8000	0.0005	0.0015
10000	0.0005	0.0010
12000	0.0005	0.0010

Maka dapat disimpulkan bahwa Keandalan Sistem CALM Buoy Tuban sebesar 0.9995 pada kondisi *Between Line* dan 0.999 pada kondisi *In Line*.

4.6 Analisa Resiko CALM Buoy Tuban

Setelah mendapatkan peluang kegagalan maka dapat dianalisis tingkat resiko dari peluang kegagalan tersebut. Dalam kasus ini matriks resiko yang dipakai ialah pada Rules DNV RP-G101 khusus mencakupi fasilitas Lepas pantai. Langkah pertama ialah mengklasifikasikan Peluang Kegagalan (*Ketidakandalan*) sistem pada

kriteria Rules DNVagar dapat ditentukan kecocokan kolom matriks resiko yang sudah disediakan yang ditampilkan pada tabel dibawah:

Table 4-1 Probability of failure description				
Cat.	Annual failure probability		Description	
	Quantitative	Qualitative		
5	$> 10^{-2}$	Failure expected	(1) In a small population*, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in location.	
4	10^{-3} to 10^{-2}	High	(1) In a large population**, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in operating company.	
3	10^{-4} to 10^{-3}	Medium	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a small number of components. (2) Failure has occurred in operating company.	
2	10^{-5} to 10^{-4}	Low	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	
1	$< 10^{-5}$	Negligible	(1) Failure is not expected. (2) Failure has not occurred in industry.	
Notes: * Small population = 20 to 50 components. ** Large population = More than 50 components				

Gambar 4.27 Kriteria Peluang Kegagalan DNV RP-G101

Berikut hasil pengklasifikasian Ranking *PoF* CALM Buoy Tuban menurut tabel kriteria peluang kegagalan diatas dapat dilihat pada tabel dibawah:

Tabel 4.17 Ranking Peluang Kegagalan Sistem Berdasarkan DNV RP-G101

Kategori	In Line		Between Line	
Kondisi	Before	After	Before	After
PoF	0.0079	0.001	0.0012	0.0005
Ranking DnV	4	3	4	3

4.6.1 Konsekuensi Kegagalan

Dimana ada peluang kegagalan, disitu pasti ada konsekuensi kegagalan. Konsekuensi kegagalan ini harus bisa diperhitungkan dengan baik dalam menganalisis resiko suatu sistem. Menurut DNV RP-G101 *Consequence of Failure (CoF)* terdapat tiga aspek yang diperhitungkan yaitu aspek keselamatan (*Safety*), Lingkungan (*Environment*), dan aspek Bisnis (*Business*). Ketiga aspek ini akan menentukan posisi resiko pada matriks resiko secara mendatar.

Berikut Analisa Konsekuensi CALM Buoy Tuban apabila mengalami Putus pada *Anchor Leg*:

a. Keselamatan

Sistem tali tambat *Single Point Mooring* terutama pada CALM Buoy merupakan sistem yang terpisah antara Kapal Tanker yang terdapat manusia dengan Buoy yang tidak dihuni manusia pada kondisi operasi. Sedangkan rantai putus hanya memberikan efek *transient* secara langsung pada buoynya saja tidak pada kapal tanker. Dan jika tali putus pada saat kondisi lingkungan ekstrim proses *offloading* antara Tanker dengan PLEM dihentikan sehingga jarang terjadi *blow out*. Menurut hasil analisis berikut maka dipilih kelas A yaitu *No Injury*

b. Lingkungan

Rantai yang putus tidak akan menghasilkan limbah yang beracun di laut. Namun rantai yang telah putus akan tenggelam menjadi sampah sembari merusak ekosistem di bawah laut seperti terumbu karang hingga tali tersebut dievakuasi yang memakan waktu lebih dari seminggu atau bahkan lebih untuk perairan dalam.

Menurut analisis berikut maka dipilih kelas C yaitu *Significant Local Effect* hal ini dikarenakan mengevakuasi *Mooring Line* lebih mudah ketimbang mengevakuasi *Platform* atau kapal yang tenggelam.



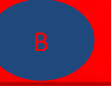



c. Bisnis

Dalam aspek bisnis putusnya tali mengharuskan proses *Offloading* antara Tanker dan PLEM dihentikan karena tidak memenuhi kriteria keamanan dan operabilitas dari CALM Buoy itu sendiri. Penghentian tersebut dihentikan hingga usai dilakukannya Inspeksi kondisi keseluruhan Tali Tambat yang memakan waktu cukup lama sehingga mengakibatkan kerugian finansial dalam proses produksi migas. Selain biaya penggantian putusnya *Mooring Line* efek *transient* dalam gerakan *Buoy* dapat merusak *subsea hose* juga dapat yang memakan biaya cukup tinggi dalam reparasinya

Berdasarkan analisis tersebut, maka dipilih kelas E

4.6.2 Matriks Resiko

Setelah menganalisis konsekuensi dari kegagalan sistem CALM Buoy Tuban berupa putusnya salah satu tali rantai dapat ditentukan posisi resiko dalam matriks resiko DNV RP-G101. Penempatan matriks berdasarkan analisis sebelumnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini:

PoF Ranking	PoF Description	A	B	C	D	E
5	(1) In a small population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in the location.	YELLOW	RED	RED	RED	RED
4	(1) In a large population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in operating company.	YELLOW 	YELLOW	RED 	RED	RED 
3	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a small number of components. (2) Failure has occurred in the operating company.	GREEN 	YELLOW	YELLOW 	RED	RED 
2	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED
1	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW
CoF Types	Safety	No Injury	Minor Injury Absence < 2 days	Major Injury Absence > 2 days	Single Fatality	Multiple Fatalities
	Environment	No pollution	Minor local effect. Can be cleaned up easily.	Significant local effect. Will take more than 1 man week to remove.	Pollution has significant effect upon the surrounding ecosystem (e.g. population of birds or fish).	Pollution that can cause massive and irreparable damage to ecosystem.
	Business	No downtime or asset damage	< € 10.000 damage or downtime < one shift	< € 100.000 damage or downtime < 4 shifts	< € 1.000.000 damage or downtime < one month	< € 10.000.000 damage or downtime one year
CoF Ranking		A	B	C	D	E

Gambar 4.28 Matriks Resiko DNV RP-G101 pada kondisi sebelum (biru) dan sesudah (putih) penggantian tali tambat
(Catatan : S (*Safety*), E (*Environment*), B (*Business*))

Berdasarkan matriks diatas, aspek keselamatan menempati kotak berwarna hijau, sedangkan lingkungan dan bisnis menempati kotak berwarna kuning. Berikut definisi resiko dari masing-masing warna kotak

a. Hijau (*Low Risk*)

Pada kotak ini resiko dapat diterima. Umumnya penanganan tertentu tetap diperlukan untuk memastikan bahwa resiko tetap berada di zona hijau ini. Penanganan ini seperti atur fungsi operator, pembersihan, hingga Inspeksi Visual untuk memastikan tidak ada perubahan pada kondisi peralatan.

b. Kuning (*Medium Risk*)

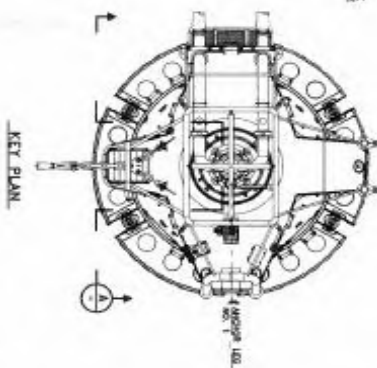
Pada kotak ini, resiko dapat diterima. Penanganan seperti NDT, tes fungsi, atau monitoring berbagai kondisi harus dilakukan untuk mengukur perambatan degradasi yang dapat menyebabkan kegagalan. Hal ini demi mencegah resiko bertambah parah dengan berpindah ke zona merah.

c. Merah (*High Risk*)

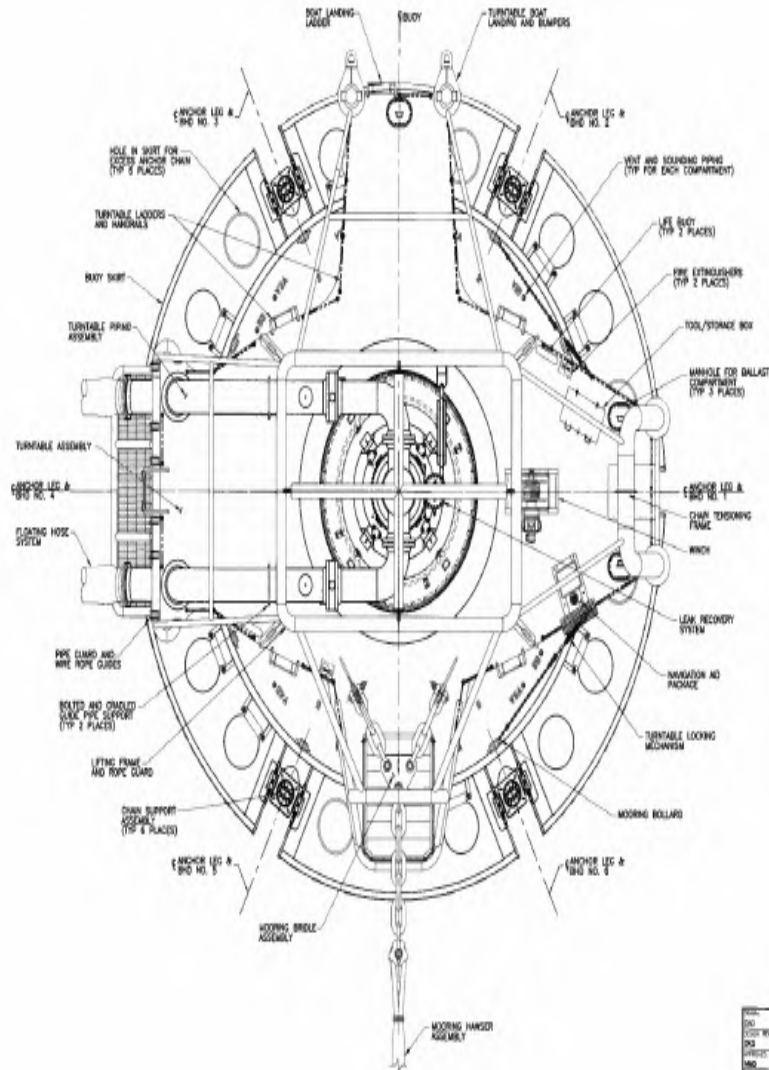
Tingkat resiko pada kotak ini tidak dapat diterima. Penanganan harus dilakukan untuk mengurangi peluang, konsekuensi atau keduanya, sehingga resiko bisa berada pada zona yang diterima.

LAMPIRAN A

Drawing



 SOFREC <small>SAISON D'OFFRE DE RECEPTION ET DE CROQUIS</small>		Date de l'opération : 12/01/01 Date de la signature : 12/01/01	
Nom et Prénom : GENEAL MANAGEMENT Adresse : BOULEVARD Code postal : 13800		Nom et Prénom : GENEAL Adresse : BOULEVARD Code postal : 13800	
Téléphone : 04 91 50 11 01 Télécopieur : 04 91 50 11 01 E-mail : g.m@sofreco.fr		Téléphone : 04 91 50 11 01 Télécopieur : 04 91 50 11 01 E-mail : g.m@sofreco.fr	
Signature : GENEAL Fonction : Directeur		Signature : GENEAL Fonction : Directeur	



SECTION A

DATE	10/10/00
DESIGN	10/10/00
CHECKED	10/10/00
APPROVED	10/10/00
REVISION	10/10/00

DESIGN NO.	1001
PROJECT CODE	1001
DATE	10/10/00
DESIGNER	10/10/00
CHECKED	10/10/00
APPROVED	10/10/00
REVISION	10/10/00

DESIGN NO.	1001
PROJECT CODE	1001
DATE	10/10/00
DESIGNER	10/10/00
CHECKED	10/10/00
APPROVED	10/10/00
REVISION	10/10/00

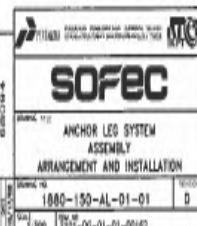
SOPEC

GENERAL ARRANGEMENT
MOORING BUOY
PLAN

1001-1001-11-02
1001-1001-11-02-001



SPU-150 CALM BUOY ANCHOR SET DOWN POINT COORDINATES		
	NORTH (M)	EAST (M)
BUOY & PLEW	9257841	803708
ANCHOR LEG 1	9258061	804003
ANCHOR LEG 2	9258128	803711
ANCHOR LEG 3	9257929	803508
ANCHOR LEG 4	9257822	803284
ANCHOR LEG 5	9257595	803888
ANCHOR LEG 6	9257774	804091



[illegible]

1. Quantities shown are for (1) one assembly, (b) six assemblies, as required.

2. FOR GENERAL NOTES SEE DMD 1000-150-A1-01-01.

[illegible]

LAMPIRAN B

Output HydroSTAR & Tabel Fatigue Life

Tanker RAO

```
# File : X1.rao
#
# Constants used in computations :
#   Reference length      :    1.0000
#   Water density (rho)   :   1025.0000
#   Gravity acceleration  :    9.8100
#   Waterdepth           :    23.5000
#   Ref.pt incident wave : ( 133.4571  0.0000)
#   Forward speed        :    0.0000 m/s
#
# Reference point of body 1: ( 132.220   0.000  13.330)
# MEANVALUE :    0.0000E+00
# AMP/PHASE
#-----
#RAOTYPE      : MOTION
#COMPONENT    : 1
#UNIT         : m/m
#NBHEADING    : 5
#HEADING      : 0.00      45.00      90.00      135.00      180.00
#---w(z/s)---
0.1000  5.816843E+00  4.319443E+00  6.775091E-03  4.320939E+00  5.819411E+00  269.2566  269.4646  178.7583  90.6023  90.7966
0.2000  2.094099E+00  1.840227E+00  5.283764E-03  1.822109E+00  2.066865E+00  267.6839  268.6735  228.7411  90.4145  90.4711
0.3000  6.722943E-01  9.146050E-01  2.828499E-02  8.149679E-01  5.494718E-01  255.1692  261.8634  234.4765  85.9710  82.3608
0.4000  8.840337E-02  3.425055E-01  6.684578E-02  2.316233E-01  1.255414E-01  146.6064  243.8351  175.2357  86.7675  268.7842
0.5000  1.223416E-01  1.029631E-01  8.056925E-02  3.180915E-02  1.961938E-01  90.5058  187.8445  105.3730  258.1888  274.3396
0.6000  2.836774E-02  8.940652E-02  4.979354E-02  9.271227E-02  1.074428E-01  116.6676  134.1238  46.9346  269.4289  321.5675
0.7000  3.092178E-02  6.190076E-02  2.505426E-02  7.722696E-02  6.332799E-02  286.9421  140.3806  23.4423  308.0742  41.5238
0.8000  1.771988E-02  1.495405E-02  1.484727E-02  4.719317E-02  5.095627E-02  335.0148  191.5922  13.3154  354.3224  127.1128
0.9000  1.212642E-02  1.886765E-02  8.892655E-03  2.512060E-02  3.009604E-02  137.3747  329.7242  13.2641  82.9851  229.3676
1.0000  4.643066E-03  1.206470E-02  5.456370E-03  2.123602E-02  2.218047E-02  282.9495  35.6872  21.2540  175.9809  351.8472
1.1000  3.945935E-03  7.840789E-03  3.560377E-03  1.364358E-02  1.440376E-02  82.0383  185.8090  35.7329  276.8966  137.6506
1.2000  3.418621E-03  4.995375E-03  2.458858E-03  1.046641E-02  9.443292E-03  276.6341  300.8193  56.1869  43.7572  297.1213
1.3000  2.588733E-03  4.083044E-03  1.773303E-03  7.061775E-03  6.579958E-03  126.7943  99.7930  80.3867  171.5424  113.7306
1.4000  1.823896E-03  2.685722E-03  1.328979E-03  5.787879E-03  4.647458E-03  357.3217  261.7423  105.5728  316.4645  307.8844
1.5000  1.521313E-03  2.216907E-03  1.012144E-03  4.164572E-03  3.351098E-03  250.1671  71.7959  129.2882  114.3964  158.9074
1.6000  1.384187E-03  1.827937E-03  7.154986E-04  3.104579E-03  2.480831E-03  145.2641  260.5123  149.9903  277.8456  23.8273
1.7000  9.797387E-04  1.434472E-03  4.366699E-04  2.489311E-03  1.819290E-03  62.7394  99.9177  165.9361  94.3765  265.2524
1.8000  9.48662E-04  1.104453E-03  1.986379E-04  2.015519E-03  1.432085E-03  356.5861  308.7443  165.0218  283.2383  160.2042
1.9000  7.235752E-04  8.294814E-04  1.441548E-04  1.629763E-03  1.105502E-03  308.1686  169.5048  107.2463  120.6426  68.8438
2.0000  6.145236E-04  6.077494E-04  2.568168E-04  1.268170E-03  8.440166E-04  267.8849  44.9074  95.2476  327.1069  351.6676
#-----
#ENDFILE X1.rao
```

```
# File : X2.rao
#
# Constants used in computations :
#   Reference length      :    1.0000
#   Water density (rho)   :   1025.0000
#   Gravity acceleration  :    9.8100
#   Waterdepth           :    23.5000
#   Ref.pt incident wave : ( 133.4571  0.0000)
#   Forward speed        :    0.0000 m/s
#
# Reference point of body 1: ( 132.220   0.000  13.330)
# MEANVALUE :    0.0000E+00
# AMP/PHASE
#-----
#RAOTYPE      : MOTION
#COMPONENT    : 2
#UNIT         : m/m
#NBHEADING    : 5
#HEADING      : 0.00      45.00      90.00      135.00      180.00
#---w(z/s)---
0.1000  1.063913E-17  4.283079E+00  6.324433E+00  4.281282E+00  5.731054E-16  23.4497  270.2509  270.0498  269.8389  266.4952
0.2000  8.459320E-18  1.761462E+00  2.968735E+00  1.754781E+00  2.235356E-16  40.7961  270.7925  270.6638  269.9225  265.0123
0.3000  4.358637E-18  8.332949E-01  1.801971E+00  8.199261E-01  8.997545E-17  305.9195  269.9637  272.6103  268.9223  263.5427
0.4000  2.261353E-18  3.251313E-01  1.213555E+00  3.064555E-01  2.704987E-17  316.7563  260.1571  275.9799  260.8190  289.5384
0.5000  9.150404E-19  5.980076E-02  8.564147E-01  3.523805E-02  1.491229E-17  164.4771  194.5471  280.3770  188.2992  6.9058
0.6000  2.851198E-18  8.847427E-02  6.162064E-01  8.663823E-02  1.761951E-17  114.1887  113.4028  286.9903  101.4507  345.9637
0.7000  4.145215E-18  5.952750E-02  4.526795E-01  6.173955E-02  1.383278E-17  241.7486  109.4145  295.6044  108.2074  305.4311
0.8000  6.009005E-19  4.026737E-03  3.309473E-01  1.522963E-02  8.322877E-18  264.4490  124.3357  306.8054  172.4955  285.1337
0.9000  1.360473E-18  1.727664E-02  2.419353E-01  2.064431E-02  2.523915E-18  326.9153  324.3837  321.1348  289.6979  334.3694
1.0000  6.495751E-19  7.961947E-03  1.752623E-01  1.451819E-02  2.120565E-18  105.4933  42.3410  339.1923  7.7637  207.4856
1.1000  7.062248E-19  6.858962E-03  1.266542E-01  1.008717E-02  3.535707E-18  63.5713  188.0648  1.3124  122.8350  110.7903
1.2000  3.473866E-19  4.575043E-03  9.176229E-02  9.043492E-03  3.141765E-18  159.2198  292.3832  27.3159  232.9032  109.0818
1.3000  9.027037E-19  4.440164E-03  6.648027E-02  6.515753E-03  1.588843E-18  297.6297  94.3779  57.0053  14.1645  71.7808
1.4000  5.030255E-19  2.480529E-03  4.796782E-02  4.555848E-03  1.055334E-18  179.5875  267.5843  90.7028  148.6499  202.3623
1.5000  3.154039E-19  1.401844E-03  3.503057E-02  3.854452E-03  1.264561E-18  236.7415  75.2524  129.3289  300.9882  299.1646
1.6000  5.428373E-20  1.083131E-03  2.662616E-02  2.839862E-03  1.027067E-18  324.7117  261.6403  172.2604  107.1391  316.3923
1.7000  1.236132E-19  9.221861E-04  2.119675E-02  2.108217E-03  3.675303E-19  185.7259  107.8157  216.6131  280.0097  352.8644
1.8000  1.954800E-19  7.798657E-04  1.661892E-02  1.699694E-03  2.719635E-19  110.1843  324.2898  261.8286  104.3576  84.1156
1.9000  1.497237E-19  6.829383E-04  1.263855E-02  1.383537E-03  2.095288E-19  53.3641  187.4446  311.8012  302.5376  23.4996
2.0000  5.969362E-20  5.401706E-04  1.028101E-02  1.137128E-03  2.531434E-19  269.8399  55.5061  6.5700  152.9351  215.8540
#-----
#ENDFILE X2.rao
```

```

# File : X3.rao
#
# Constants used in computations :
#   Reference length      :    1.0000
#   Water density (rho)   :   1025.0000
#   Gravity acceleration   :    9.8100
#   Waterdepth           :    23.5000
#   Ref.pt incident wave : ( 133.4571  0.0000)
#   Forward speed        :    0.0000 m/s
#
# Reference point of body 1: ( 132.220  0.000  13.330)
# MEANVALUE :    0.0000E+00
# AMP/PHASE
#-----
#RAOTYPE : MOTION
#COMPONENT : 3
#UNIT : m/m
#NBHEADING 5
#HEADING      0.00      45.00      90.00      135.00      180.00
#---w(z/s)---
0.1000  9.359396E-01  9.804371E-01  1.026229E+00  9.804592E-01  9.359198E-01  359.6554  359.8827  359.9131  359.5141  359.2959
0.2000  6.980935E-01  8.942436E-01  1.122378E+00  9.038457E-01  7.111004E-01  351.6199  355.3793  358.0039  357.0866  356.3859
0.3000  2.452164E-01  6.660227E-01  1.311912E+00  7.600661E-01  3.604593E-01  324.2022  344.0660  350.5998  355.0302  5.2041
0.4000  2.455094E-01  2.766242E-01  1.535719E+00  6.133640E-01  1.950666E-01  162.7367  308.4285  327.6212  343.1009  58.4181
0.5000  2.112655E-01  1.871880E-01  1.123288E+00  1.955153E-01  2.249924E-01  129.0549  122.3672  293.7302  307.9713  78.4894
0.6000  7.944592E-02  1.614184E-01  6.330510E-01  9.236985E-02  5.647357E-02  187.6931  101.5820  277.6931  73.8367  76.4016
0.7000  5.717501E-02  6.890711E-02  3.285698E-01  6.771142E-02  4.104526E-02  254.0249  130.4886  275.4365  67.1072  214.7653
0.8000  2.245264E-02  3.013186E-02  1.770687E-01  4.049094E-03  1.625340E-02  339.0030  215.6272  283.8261  115.8308  257.7038
0.9000  1.349245E-02  2.270159E-02  9.627388E-02  1.601911E-02  1.299649E-02  92.5824  295.5433  297.9452  253.2998  34.5537
1.0000  6.354582E-03  1.092968E-02  5.334475E-02  4.846868E-03  4.934674E-03  246.4306  38.5064  316.8295  308.2028  146.2445
1.1000  2.963544E-03  8.122081E-03  2.980139E-02  4.278135E-03  3.866587E-03  61.3642  153.0464  339.4277  104.7390  278.8193
1.2000  1.874155E-03  4.537447E-03  1.674791E-02  2.332344E-03  2.482629E-03  256.3828  294.0265  4.3804  199.1521  88.2821
1.3000  1.397295E-03  2.831517E-03  9.324959E-03  2.010507E-03  1.456284E-03  102.4057  74.6739  31.3972  2.0278  270.5850
1.4000  9.510315E-04  1.948763E-03  4.817225E-03  6.942155E-04  8.777304E-04  321.4749  239.8389  66.9472  149.4612  102.0237
1.5000  5.946545E-04  1.145629E-03  3.428877E-03  7.237708E-04  5.233014E-04  204.7374  58.7316  93.3053  272.6010  308.2324
1.6000  4.318016E-04  7.782363E-04  2.118329E-03  6.304476E-04  3.679304E-04  107.7090  249.1432  131.6091  93.7200  172.9080
1.7000  3.093347E-04  5.850114E-04  1.317169E-03  3.961214E-04  2.501015E-04  19.8143  94.4332  158.5997  275.2355  43.6801
1.8000  2.043776E-04  4.566983E-04  5.661225E-04  2.785128E-04  1.614610E-04  314.1636  309.7521  194.4930  101.2657  296.6337
1.9000  1.495600E-04  3.303540E-04  3.872430E-04  2.505035E-04  9.142862E-05  272.1833  175.4347  289.6370  304.8632  208.8506
2.0000  1.184757E-04  2.402978E-04  5.634683E-04  2.573750E-04  6.943793E-05  230.1684  55.4179  328.0452  155.5133  144.2246
#-----
#ENDFILE X3.rao

```

```

# File : X4.rao
#
# Constants used in computations :
#   Reference length      :    1.0000
#   Water density (rho)   :   1025.0000
#   Gravity acceleration   :    9.8100
#   Waterdepth           :    23.5000
#   Ref.pt incident wave : ( 133.4571  0.0000)
#   Forward speed        :    0.0000 m/s
#
# Reference point of body 1: ( 132.220  0.000  13.330)
# MEANVALUE :    0.0000E+00
# AMP/PHASE
#-----
#RAOTYPE : MOTION
#COMPONENT : 4
#UNIT : deg/m
#NBHEADING 5
#HEADING      0.00      45.00      90.00      135.00      180.00
#---w(z/s)---
0.1000  4.478666E-18  2.432249E-01  3.564415E-01  2.431556E-01  4.172550E-17  81.3582  267.8230  270.0279  272.2631  271.6227
0.2000  1.364880E-18  3.738542E-01  6.037747E-01  3.735139E-01  5.024946E-17  75.8019  265.8319  270.6160  274.8534  258.6466
0.3000  1.006695E-17  3.749400E-01  7.101607E-01  3.714883E-01  4.214280E-17  234.5489  262.7195  272.7334  275.9211  256.6397
0.4000  2.713958E-18  2.814397E-01  7.192472E-01  2.616946E-01  4.601871E-17  15.7740  252.5916  276.4553  268.5092  277.3799
0.5000  7.691825E-18  1.288274E-01  6.725414E-01  1.034861E-01  1.822930E-17  269.0761  229.0547  281.0988  236.8764  277.2243
0.6000  7.813629E-18  3.427562E-02  5.930465E-01  7.934367E-02  8.943523E-18  84.5903  158.9402  287.7031  152.2895  269.4124
0.7000  5.832107E-18  4.563929E-02  5.130682E-01  8.673966E-02  1.506687E-17  233.6240  78.2607  296.7679  135.3377  326.4548
0.8000  3.203350E-18  3.976002E-02  4.312605E-01  4.155479E-02  1.518478E-17  352.5835  53.5505  307.7404  145.6497  301.7352
0.9000  2.628465E-18  2.144930E-02  3.635045E-01  8.897465E-03  8.971342E-18  328.5006  55.2578  322.3190  357.6740  279.8339
1.0000  1.079349E-18  4.083910E-03  2.815693E-01  2.846317E-02  8.624687E-18  351.3901  129.8018  340.3968  25.3024  222.1569
1.1000  1.359767E-18  1.284751E-02  2.201485E-01  6.895059E-03  1.189457E-17  83.2816  274.3811  2.8013  120.2373  96.1357
1.2000  1.076575E-18  2.415567E-02  1.693392E-01  1.653093E-02  6.433587E-18  159.9882  304.9135  29.2708  247.7618  110.0521
1.3000  2.003240E-18  7.163059E-03  1.281546E-01  8.059437E-03  4.873730E-18  301.8929  134.4556  59.6715  31.4546  78.2845
1.4000  6.327909E-19  4.103660E-03  9.575795E-02  7.969371E-03  1.680304E-18  192.5717  322.1760  94.4003  161.6650  220.1452
1.5000  6.504706E-19  1.807853E-03  7.194638E-02  6.630220E-03  3.215941E-18  276.9188  124.1027  134.1528  315.5986  300.2812
1.6000  9.602141E-20  1.385193E-03  5.681000E-02  4.294022E-03  2.245898E-18  264.3804  297.8309  177.1567  114.7460  299.7080
1.7000  2.111479E-19  1.180807E-03  4.575711E-02  3.540666E-03  1.313351E-18  198.5791  140.7296  220.8972  281.6004  356.9373
1.8000  5.594830E-19  9.786780E-04  3.570178E-02  2.973519E-03  8.350614E-19  98.1239  354.8124  266.4277  108.1963  97.0395
1.9000  2.094492E-19  8.575364E-04  2.758770E-02  2.321880E-03  6.967341E-19  77.3608  212.3839  317.2649  307.1995  77.2369
2.0000  9.010095E-20  6.451784E-04  2.281205E-02  1.825019E-03  4.966223E-19  303.5077  73.5386  12.1933  156.9910  194.4406
#-----
#ENDFILE X4.rao

```

```
# File : X5.rao
#
# Constants used in computations :
# Reference length : 1.0000
# Water density (rho) : 1025.0000
# Gravity acceleration : 9.8100
# Waterdepth : 23.5000
# Ref.pt incident wave : ( 133.4571 0.0000)
# Forward speed : 0.0000 m/s
#
# Reference point of body 1: ( 132.220 0.000 13.330)
# MEANVALUE : 0.0000E+00
# AMP/PHASE
#-----
#RAOTYPE : MOTION
#COMPONENT : 5
#UNIT : deg/m
#NBHEADING 5
#HEADING 0.00 45.00 90.00 135.00 180.00
#-----w(r/s)-----
0.1000 3.647201E-01 2.653922E-01 4.040653E-03 2.651493E-01 3.643387E-01 94.5552 93.6786 179.3216 266.3849 265.4922
0.2000 6.786205E-01 5.412610E-01 2.398090E-02 5.252720E-01 6.578970E-01 98.3868 97.3258 170.3254 261.3267 259.3317
0.3000 8.420996E-01 8.546250E-01 8.830084E-02 7.595872E-01 7.746294E-01 91.5911 92.9425 141.4882 249.7986 246.6205
0.4000 4.647880E-01 9.694831E-01 2.292542E-01 7.954528E-01 4.926941E-01 77.7213 76.6877 89.0266 230.3474 226.0629
0.5000 1.893624E-01 6.457659E-01 3.104788E-01 5.811425E-01 7.380794E-02 172.4201 53.9486 12.2474 203.1851 256.5302
0.6000 2.076736E-01 1.556397E-01 1.702837E-01 1.470108E-01 1.400004E-01 191.6357 60.1343 314.5587 173.7392 323.2757
0.7000 6.898271E-02 8.719594E-02 8.225764E-02 4.475076E-02 3.222336E-02 247.7296 166.8727 296.4478 332.7935 345.7920
0.8000 4.543143E-02 6.507020E-02 4.667852E-02 4.704669E-02 3.047501E-02 350.5893 211.8253 293.8807 336.5516 120.1513
0.9000 1.797409E-02 2.637536E-02 2.785205E-02 5.430046E-03 9.458030E-03 106.6876 299.8455 300.4804 26.6201 201.9528
1.0000 9.378812E-03 2.081508E-02 1.769483E-02 1.056651E-02 8.588857E-03 239.9683 43.5066 313.3177 173.7150 325.3906
1.1000 5.426711E-03 1.064370E-02 1.162728E-02 3.160251E-03 4.128324E-03 51.2584 165.2060 332.2580 260.8927 114.5545
1.2000 3.328942E-03 7.394025E-03 7.872932E-03 2.896420E-03 1.965976E-03 248.3850 290.9178 355.9649 49.3704 257.6122
1.3000 2.253074E-03 4.850248E-03 5.480181E-03 1.343654E-03 1.233147E-03 100.2718 84.4899 22.7366 151.5655 62.4671
1.4000 1.592188E-03 2.948143E-03 3.837482E-03 1.776063E-03 8.039776E-04 326.0813 246.6245 51.3173 311.7804 257.7254
1.5000 1.091540E-03 1.934021E-03 2.557719E-03 1.187055E-03 6.197681E-04 204.5326 61.1324 83.0400 131.6511 106.9507
1.6000 7.239745E-04 1.293212E-03 1.631025E-03 7.116170E-04 4.013002E-04 99.6085 253.8083 117.9097 296.5167 320.5056
1.7000 4.972129E-04 8.906835E-04 9.891871E-04 6.145982E-04 2.487014E-04 17.2521 100.4437 162.4159 105.7563 202.1611
1.8000 3.316853E-04 6.653056E-04 6.530246E-04 5.259333E-04 1.628524E-04 308.6002 317.3950 218.7092 292.5905 88.9899
1.9000 2.540255E-04 5.188308E-04 5.288533E-04 3.837776E-04 1.178387E-04 260.2638 184.1961 278.8905 125.7896 358.3880
2.0000 1.923405E-04 3.813934E-04 4.801418E-04 2.402294E-04 7.796344E-05 227.1388 62.8168 335.6575 328.5121 274.8654
#-----
#ENDFILE X5.rao
```

```
# File : X6.rao
#
# Constants used in computations :
# Reference length : 1.0000
# Water density (rho) : 1025.0000
# Gravity acceleration : 9.8100
# Waterdepth : 23.5000
# Ref.pt incident wave : ( 133.4571 0.0000)
# Forward speed : 0.0000 m/s
#
# Reference point of body 1: ( 132.220 0.000 13.330)
# MEANVALUE : 0.0000E+00
# AMP/PHASE
#-----
#RAOTYPE : MOTION
#COMPONENT : 6
#UNIT : deg/m
#NBHEADING 5
#HEADING 0.00 45.00 90.00 135.00 180.00
#-----w(r/s)-----
0.1000 1.923601E-17 1.020706E+00 3.927961E-02 1.021020E+00 1.343499E-16 286.0746 181.9702 270.2558 357.9382 3.8369
0.2000 2.590540E-18 9.251804E-01 1.366276E-02 9.274289E-01 1.210729E-16 178.6390 180.8717 275.4567 357.9662 349.8724
0.3000 4.039938E-18 7.605067E-01 5.687819E-03 7.676908E-01 9.613544E-17 352.3128 179.3157 303.1872 356.6815 348.0574
0.4000 1.721978E-18 5.386447E-01 4.271032E-03 5.539611E-01 5.205589E-17 282.7026 176.8025 337.3355 354.5380 329.9617
0.5000 5.771059E-19 2.928897E-01 3.700962E-03 3.079108E-01 1.933584E-17 305.0585 170.8182 352.5552 349.9654 307.5632
0.6000 8.894131E-19 7.513304E-02 2.674335E-03 7.971020E-02 5.055576E-18 85.0320 152.4735 0.5043 345.9541 190.5841
0.7000 2.384871E-18 4.043709E-02 1.696042E-03 3.533122E-02 7.967977E-18 192.9532 28.5386 23.0105 173.6937 102.0432
0.8000 1.035810E-18 3.932793E-02 9.806667E-04 4.705926E-02 9.036622E-18 252.8480 28.4747 39.7827 190.1834 7.7430
0.9000 6.572952E-19 5.809277E-03 7.569274E-04 1.695899E-02 3.715401E-18 37.8214 119.4562 139.5303 254.0496 2.3789
1.0000 9.948855E-19 1.308129E-02 1.559081E-03 1.525500E-02 1.163466E-18 211.7489 249.9166 172.3573 14.6362 51.6541
1.1000 4.577976E-19 7.926767E-03 2.223486E-03 1.233009E-02 1.374152E-18 316.7392 351.5244 184.4410 113.1465 16.3285
1.2000 4.329660E-19 6.942679E-03 2.496094E-03 7.972544E-03 8.354452E-19 244.0449 144.7886 196.9281 241.7658 104.4970
1.3000 4.847388E-19 3.234273E-03 2.406173E-03 6.539496E-03 9.057896E-19 108.0308 284.3359 212.3350 0.5390 247.1761
1.4000 3.479079E-19 3.079750E-03 2.122512E-03 5.536680E-03 1.025135E-18 272.3058 68.7185 230.8427 149.9572 174.8473
1.5000 1.223395E-19 2.483784E-03 1.741948E-03 4.019767E-03 5.937782E-19 131.6337 251.5120 251.4376 303.1683 346.2619
1.6000 7.372359E-20 1.721348E-03 1.303085E-03 3.227488E-03 8.384645E-19 167.1316 85.7219 273.2510 105.1019 207.9215
1.7000 8.314410E-20 1.247656E-03 8.566188E-04 2.591804E-03 5.649793E-19 17.1241 287.1865 295.0867 282.4104 354.2090
1.8000 1.894285E-19 9.426549E-04 4.329988E-04 2.011644E-03 1.414391E-19 92.5719 139.1433 314.8203 109.4148 35.9675
1.9000 7.253561E-20 7.370586E-04 1.008298E-04 1.542633E-03 3.651666E-19 126.0770 6.0176 309.4996 305.0411 187.1793
2.0000 1.420124E-19 6.136518E-04 1.757915E-04 1.191590E-03 7.309985E-20 62.9696 244.2793 219.2253 152.7979 51.1299
#-----
#ENDFILE X6.rao
```


RAO CALM Buoy

```
# File : surge.rao
#
# Constants used in computations :
#   Reference length      : 1.0000
#   Water density (rho)   : 1025.0000
#   Gravity acceleration  : 9.8100
#   Waterdepth           : 23.5000
#   Ref.pt incident wave : ( 0.0000 0.0000)
#   Forward speed        : 0.0000 m/s
#
# Reference point of body 1: ( 0.000 0.000 1.650)
# MEANVALUE : 0.0000E+00
# AMP/PHASE
#-----
#RAOTYPE : MOTION
#COMPONENT : 1
#UNIT : m/m
#NBHEADING 5
#HEADING 0.00 45.00 90.00 135.00 180.00
#---w(z/s)---
0.1000 6.469896E+00 4.574907E+00 6.370644E-09 4.574907E+00 6.469896E+00 270.0000 270.0000 0.0908 90.0000 90.0000
0.2000 3.250800E+00 2.298663E+00 6.243922E-09 2.298663E+00 3.250800E+00 270.0002 270.0002 0.3485 90.0002 90.0002
0.3000 2.188328E+00 1.547382E+00 6.233986E-09 1.547382E+00 2.188328E+00 270.0014 270.0014 0.7252 90.0014 90.0014
0.4000 1.666497E+00 1.178392E+00 6.378274E-09 1.178392E+00 1.666497E+00 270.0049 270.0049 1.1499 90.0049 90.0049
0.5000 1.361805E+00 9.629415E-01 6.698457E-09 9.629415E-01 1.361805E+00 270.0139 270.0139 1.5198 90.0139 90.0139
0.6000 1.166314E+00 8.247085E-01 7.216558E-09 8.247085E-01 1.166314E+00 270.0345 270.0345 1.6871 90.0345 90.0345
0.7000 1.033417E+00 7.307361E-01 7.971375E-09 7.307361E-01 1.033417E+00 270.0789 270.0789 1.4340 90.0789 90.0789
0.8000 9.389199E-01 6.639167E-01 9.022360E-09 6.639167E-01 9.389199E-01 270.1681 270.1681 0.4414 90.1681 90.1681
0.9000 8.679025E-01 6.136999E-01 1.044495E-08 6.136999E-01 8.679025E-01 270.3334 270.3334 358.2881 90.3334 90.3334
1.0000 8.098158E-01 5.726265E-01 1.231846E-08 5.726265E-01 8.098158E-01 270.6087 270.6087 354.5366 90.6087 90.6087
1.1000 7.570660E-01 5.353270E-01 1.472170E-08 5.353270E-01 7.570660E-01 271.0139 271.0139 348.9032 91.0139 91.0139
1.2000 7.048017E-01 4.983709E-01 1.773233E-08 4.983709E-01 7.048017E-01 271.5445 271.5445 341.3693 91.5445 91.5445
1.3000 6.503627E-01 4.598773E-01 2.140916E-08 4.598773E-01 6.503627E-01 272.1811 272.1811 331.2169 92.1811 92.1811
1.4000 5.924019E-01 4.188937E-01 2.548245E-08 4.188937E-01 5.924019E-01 272.9239 272.9237 316.8999 92.9237 92.9239
1.5000 5.303652E-01 3.750281E-01 2.888103E-08 3.750281E-01 5.303652E-01 273.8515 273.8510 298.3366 93.8510 93.8515
1.6000 4.649166E-01 3.287498E-01 3.027638E-08 3.287497E-01 4.649166E-01 275.1589 275.1578 276.8130 95.1578 95.1589
1.7000 3.980395E-01 2.814601E-01 2.854331E-08 2.814601E-01 3.980395E-01 277.1925 277.1903 254.4845 97.1903 97.1925
1.8000 3.330784E-01 2.355220E-01 2.420623E-08 2.355220E-01 3.330784E-01 280.3689 280.3647 234.9866 100.3647 100.3689
1.9000 2.735625E-01 1.934282E-01 1.932019E-08 1.934282E-01 2.735624E-01 285.0530 285.0465 220.8565 105.0465 105.0530
2.0000 2.219340E-01 1.569071E-01 1.531312E-08 1.569071E-01 2.219340E-01 291.4563 291.4497 211.9927 111.4497 111.4563
#-----
#ENDFILE surge.rao
```

```
# File : sway.rao
#
# Constants used in computations :
#   Reference length      : 1.0000
#   Water density (rho)   : 1025.0000
#   Gravity acceleration  : 9.8100
#   Waterdepth           : 23.5000
#   Ref.pt incident wave : ( 0.0000 0.0000)
#   Forward speed        : 0.0000 m/s
#
# Reference point of body 1: ( 0.000 0.000 1.650)
# MEANVALUE : 0.0000E+00
# AMP/PHASE
#-----
#RAOTYPE : MOTION
#COMPONENT : 2
#UNIT : m/m
#NBHEADING 5
#HEADING 0.00 45.00 90.00 135.00 180.00
#---w(z/s)---
0.1000 2.909545E-16 4.574907E+00 6.469896E+00 4.574907E+00 7.843500E-16 0.9521 270.0000 270.0000 270.0000 263.3055
0.2000 1.737413E-17 2.298663E+00 3.250800E+00 2.298663E+00 3.950994E-16 143.6489 270.0002 270.0002 270.0002 266.5254
0.3000 3.079732E-17 1.547382E+00 2.188328E+00 1.547382E+00 2.380450E-16 197.2433 270.0014 270.0014 270.0014 273.7535
0.4000 2.235745E-17 1.178392E+00 1.666497E+00 1.178392E+00 2.169335E-16 275.0640 270.0049 270.0049 270.0049 247.0959
0.5000 1.428515E-17 9.629415E-01 1.361805E+00 9.629415E-01 1.545731E-16 284.5874 270.0139 270.0139 270.0139 267.1832
0.6000 2.540814E-17 8.247085E-01 1.166314E+00 8.247085E-01 1.397806E-16 171.9275 270.0345 270.0345 270.0345 270.9847
0.7000 7.875294E-18 7.307361E-01 1.033417E+00 7.307361E-01 1.273022E-16 249.9698 270.0789 270.0789 270.0789 264.1719
0.8000 2.756736E-18 6.639167E-01 9.389199E-01 6.639167E-01 1.281788E-16 245.2341 270.1681 270.1681 270.1681 246.7089
0.9000 2.864618E-17 6.136999E-01 8.679025E-01 6.136999E-01 1.032943E-16 328.0046 270.3334 270.3334 270.3334 258.8156
1.0000 2.671783E-17 5.726265E-01 8.098158E-01 5.726265E-01 9.972665E-17 207.1247 270.6087 270.6087 270.6087 278.3198
1.1000 2.023513E-17 5.353270E-01 7.570660E-01 5.353270E-01 1.056231E-16 75.9592 271.0139 271.0139 271.0139 289.2463
1.2000 8.533927E-18 4.983709E-01 7.048017E-01 4.983709E-01 7.787899E-17 39.4691 271.5444 271.5444 271.5444 252.3993
1.3000 6.183736E-18 4.598773E-01 6.503627E-01 4.598773E-01 6.840280E-17 221.8576 272.1811 272.1811 272.1811 276.4255
1.4000 7.397177E-18 4.188936E-01 5.924019E-01 4.188936E-01 5.372259E-17 80.0516 272.9237 272.9237 272.9237 249.2683
1.5000 1.074764E-17 3.750281E-01 5.303652E-01 3.750281E-01 7.047431E-17 108.9818 273.8510 273.8510 273.8510 270.5077
1.6000 4.437110E-18 3.287498E-01 4.649166E-01 3.287498E-01 6.382804E-17 211.4861 275.1578 275.1578 275.1578 269.0500
1.7000 5.364747E-18 2.814601E-01 3.980395E-01 2.814601E-01 5.827519E-17 256.5738 277.1903 277.1925 277.1903 276.4746
1.8000 1.598693E-17 2.355220E-01 3.330784E-01 2.355220E-01 4.556510E-17 302.1123 280.3647 280.3689 280.3647 274.2735
1.9000 3.022928E-18 1.934282E-01 2.735624E-01 1.934282E-01 3.424209E-17 54.8274 285.0465 285.0530 285.0465 276.1241
2.0000 5.160611E-18 1.569071E-01 2.219340E-01 1.569071E-01 3.448791E-17 208.8472 291.4497 291.4563 291.4497 288.6133
#-----
#ENDFILE sway.rao
```



```

# File : heave.rao
#
# Constants used in computations :
#   Reference length      : 1.0000
#   Water density (rho)   : 1025.0000
#   Gravity acceleration  : 9.8100
#   Waterdepth           : 23.5000
#   Ref.pt incident wave : ( 0.0000 0.0000)
#   Forward speed        : 0.0000 m/s
#
# Reference point of body 1: ( 0.000 0.000 1.650)
# MEANVALUE : 0.0000E+00
# AMP/PHASE
#-----
#RAOTYPE : MOTION
#COMPONENT : 3
#UNIT : m/m
#NBHEADING 5
#HEADING 0.00 45.00 90.00 135.00 180.00
#---w(x/s)---
0.1000 2.470784E-01 2.470784E-01 2.470784E-01 2.470784E-01 2.470784E-01 359.8832 359.8832 359.8832 359.8832 359.8832
0.2000 2.409535E-01 2.409535E-01 2.409535E-01 2.409535E-01 2.409535E-01 359.5430 359.5430 359.5430 359.5430 359.5430
0.3000 2.309795E-01 2.309795E-01 2.309795E-01 2.309795E-01 2.309795E-01 359.0355 359.0355 359.0355 359.0355 359.0355
0.4000 2.171589E-01 2.171589E-01 2.171589E-01 2.171589E-01 2.171589E-01 358.4523 358.4523 358.4523 358.4523 358.4523
0.5000 1.995223E-01 1.995223E-01 1.995223E-01 1.995223E-01 1.995223E-01 357.9382 357.9382 357.9382 357.9382 357.9382
0.6000 1.782371E-01 1.782371E-01 1.782371E-01 1.782371E-01 1.782371E-01 357.6965 357.6965 357.6965 357.6965 357.6965
0.7000 1.536990E-01 1.536990E-01 1.536990E-01 1.536990E-01 1.536990E-01 357.9850 357.9850 357.9850 357.9850 357.9850
0.8000 1.265393E-01 1.265393E-01 1.265393E-01 1.265393E-01 1.265393E-01 359.0862 359.0862 359.0862 359.0862 359.0862
0.9000 9.747673E-02 9.747673E-02 9.747673E-02 9.747673E-02 9.747673E-02 1.2563 1.2563 1.2563 1.2563 1.2563
1.0000 6.681142E-02 6.681142E-02 6.681142E-02 6.681142E-02 6.681142E-02 4.7254 4.7254 4.7254 4.7254 4.7254
1.1000 3.432936E-02 3.432936E-02 3.432936E-02 3.432936E-02 3.432936E-02 9.7791 9.7791 9.7791 9.7791 9.7791
1.2000 9.614391E-04 9.614097E-04 9.614412E-04 9.614129E-04 9.614433E-04 210.0366 210.0377 210.0368 210.0380 210.0370
1.3000 3.974454E-02 3.974446E-02 3.974454E-02 3.974446E-02 3.974454E-02 192.7742 192.7743 192.7742 192.7743 192.7743
1.4000 7.876737E-02 7.876723E-02 7.876737E-02 7.876724E-02 7.876737E-02 181.9456 181.9458 181.9456 181.9458 181.9456
1.5000 1.074908E-01 1.074906E-01 1.074908E-01 1.074907E-01 1.074908E-01 168.8859 168.8862 168.8859 168.8862 168.8859
1.6000 1.209181E-01 1.209180E-01 1.209181E-01 1.209180E-01 1.209181E-01 158.7040 158.7040 158.7040 158.7040 158.7040
1.7000 1.229441E-01 1.229443E-01 1.229441E-01 1.229443E-01 1.229441E-01 152.6723 152.6730 152.6723 152.6731 152.6723
1.8000 1.189729E-01 1.189736E-01 1.189729E-01 1.189736E-01 1.189729E-01 150.2309 150.2320 150.2309 150.2320 150.2309
1.9000 1.110010E-01 1.110030E-01 1.110010E-01 1.110030E-01 1.110010E-01 150.4012 150.4028 150.4012 150.4028 150.4012
2.0000 1.013633E-01 1.013673E-01 1.013633E-01 1.013673E-01 1.013633E-01 152.5619 152.5637 152.5619 152.5637 152.5619
#-----
#ENDFILE heave.rao

```

```

# File : roll.rao
#
# Constants used in computations :
#   Reference length      : 1.0000
#   Water density (rho)   : 1025.0000
#   Gravity acceleration  : 9.8100
#   Waterdepth           : 23.5000
#   Ref.pt incident wave : ( 0.0000 0.0000)
#   Forward speed        : 0.0000 m/s
#
# Reference point of body 1: ( 0.000 0.000 1.650)
# MEANVALUE : 0.0000E+00
# AMP/PHASE
#-----
#RAOTYPE : MOTION
#COMPONENT : 4
#UNIT : deg/m
#NBHEADING 5
#HEADING 0.00 45.00 90.00 135.00 180.00
#---w(x/s)---
0.1000 1.237649E-16 2.527445E-01 3.574346E-01 2.527445E-01 7.220327E-17 175.2101 269.9999 269.9999 269.9999 203.5828
0.2000 1.498530E-16 4.200900E-01 5.940969E-01 4.200900E-01 4.182833E-17 351.8131 270.0002 270.0002 270.0002 232.0464
0.3000 1.418254E-16 5.159036E-01 7.295979E-01 5.159036E-01 2.188545E-17 3.8292 270.0012 270.0012 270.0012 190.1654
0.4000 1.615018E-16 5.736458E-01 8.112577E-01 5.736458E-01 9.035388E-17 7.5008 270.0046 270.0046 270.0046 270.3089
0.5000 1.222243E-16 6.201789E-01 8.770654E-01 6.201789E-01 6.544763E-17 165.9881 270.0133 270.0133 270.0133 241.9078
0.6000 3.872782E-17 6.687019E-01 9.456873E-01 6.687019E-01 2.251466E-16 190.0250 270.0335 270.0335 270.0335 192.4074
0.7000 2.113687E-16 7.245522E-01 1.024671E+00 7.245522E-01 1.875771E-16 209.5643 270.0771 270.0771 270.0771 332.1745
0.8000 9.118460E-17 7.886505E-01 1.115320E+00 7.886505E-01 2.207071E-16 133.8700 270.1649 270.1649 270.1649 327.5528
0.9000 3.029518E-17 8.585195E-01 1.214129E+00 8.585195E-01 2.985084E-16 341.8444 270.3280 270.3280 270.3280 298.6428
1.0000 2.479469E-16 9.287051E-01 1.313386E+00 9.287051E-01 2.333836E-16 5.5004 270.5995 270.5995 270.5995 251.3055
1.1000 1.991617E-16 9.920481E-01 1.402966E+00 9.920481E-01 1.896421E-16 255.5862 270.9995 270.9995 270.9995 242.4787
1.2000 8.014553E-17 1.041535E+00 1.472950E+00 1.041535E+00 3.729690E-16 245.1745 271.5239 271.5240 271.5239 293.0904
1.3000 1.753579E-16 1.071275E+00 1.515005E+00 1.071275E+00 2.131644E-16 81.9482 272.1553 272.1554 272.1553 271.7378
1.4000 1.117469E-16 1.076370E+00 1.522206E+00 1.076370E+00 3.645433E-16 256.2989 272.8958 272.8960 272.8958 280.5573
1.5000 8.741554E-17 1.052627E+00 1.488623E+00 1.052627E+00 1.982577E-16 87.1700 273.8531 273.8536 273.8531 282.3094
1.6000 4.865418E-17 9.992814E-01 1.413175E+00 9.992813E-01 2.370345E-16 38.7573 275.1611 275.1622 275.1611 272.2571
1.7000 5.928779E-17 9.185527E-01 1.299006E+00 9.185527E-01 1.003968E-16 9.3214 277.1948 277.1971 277.1948 303.9109
1.8000 6.210372E-17 8.183268E-01 1.157281E+00 8.183268E-01 1.505337E-16 122.6630 280.3709 280.3752 280.3709 275.8155
1.9000 1.309403E-17 7.095961E-01 1.003564E+00 7.095961E-01 1.259266E-16 315.2806 285.0539 285.0607 285.0539 278.4984
2.0000 3.292867E-17 6.027287E-01 8.525142E-01 6.027287E-01 9.069610E-17 214.4618 291.4562 291.4632 291.4562 251.6087
#-----
#ENDFILE roll.rao

```

```

# File : pitch.rao
#
# Constants used in computations :
#   Reference length      : 1.0000
#   Water density (rho)   : 1025.0000
#   Gravity acceleration  : 9.8100
#   Waterdepth           : 23.5000
#   Ref.pt incident wave : ( 0.0000 0.0000)
#   Forward speed        : 0.0000 m/s
#
# Reference point of body 1: ( 0.000 0.000 1.650)
# MEANVALUE : 0.0000E+00
# AMP/PHASE
#-----
#RAOTYPE : MOTION
#COMPONENT : 5
#UNIT : deg/m
#NBHEADING 5
#HEADING 0.00 45.00 90.00 135.00 180.00
#---w(z/s)---
0.1000 3.574346E-01 2.527445E-01 5.388334E-09 2.527445E-01 3.574346E-01 89.9999 89.9999 180.1051 269.9999 269.9999
0.2000 5.940969E-01 4.200900E-01 1.659065E-08 4.200900E-01 5.940969E-01 90.0002 90.0002 180.4450 270.0002 270.0002
0.3000 7.295979E-01 5.159036E-01 2.795335E-08 5.159036E-01 7.295979E-01 90.0012 90.0012 180.9885 270.0012 270.0012
0.4000 8.112577E-01 5.736458E-01 3.723198E-08 5.736458E-01 8.112577E-01 90.0046 90.0046 181.7075 270.0046 270.0046
0.5000 8.770654E-01 6.201789E-01 4.461440E-08 6.201789E-01 8.770654E-01 90.0133 90.0133 182.5695 270.0133 270.0133
0.6000 9.456873E-01 6.687019E-01 5.087160E-08 6.687019E-01 9.456873E-01 90.0335 90.0335 183.5380 270.0335 270.0335
0.7000 1.024671E+00 7.245522E-01 5.676371E-08 7.245522E-01 1.024671E+00 90.0771 90.0771 184.5561 270.0771 270.0771
0.8000 1.115320E+00 7.886505E-01 6.299980E-08 7.886505E-01 1.115320E+00 90.1649 90.1649 185.4971 270.1649 270.1649
0.9000 1.214129E+00 8.585195E-01 7.029321E-08 8.585195E-01 1.214129E+00 90.3280 90.3280 186.0889 270.3280 270.3280
1.0000 1.313386E+00 9.287050E-01 7.933888E-08 9.287051E-01 1.313386E+00 90.5995 90.5995 185.8916 270.5995 270.5995
1.1000 1.402966E+00 9.920481E-01 9.070154E-08 9.920481E-01 1.402966E+00 90.9995 90.9995 184.4278 270.9995 270.9995
1.2000 1.472950E+00 1.041535E+00 1.047014E-07 1.041535E+00 1.472950E+00 91.5240 91.5239 181.3879 271.5239 271.5240
1.3000 1.515005E+00 1.071275E+00 1.212528E-07 1.071275E+00 1.515005E+00 92.1554 92.1553 175.8530 272.1553 272.1554
1.4000 1.522206E+00 1.076370E+00 1.382574E-07 1.076370E+00 1.522206E+00 92.8960 92.8958 166.2234 272.8958 272.8960
1.5000 1.488623E+00 1.052627E+00 1.496861E-07 1.052627E+00 1.488623E+00 93.8536 93.8531 152.3343 273.8531 273.8536
1.6000 1.413175E+00 9.992814E-01 1.490005E-07 9.992813E-01 1.413175E+00 95.1622 95.1611 135.2619 275.1611 275.1622
1.7000 1.299006E+00 9.185527E-01 1.321665E-07 9.185527E-01 1.299006E+00 97.1971 97.1948 117.0397 277.1948 277.1971
1.8000 1.157281E+00 8.183268E-01 1.042603E-07 8.183268E-01 1.157281E+00 100.3752 100.3709 101.1510 280.3709 280.3752
1.9000 1.003564E+00 7.095961E-01 7.642171E-08 7.095961E-01 1.003564E+00 105.0607 105.0539 89.8432 285.0539 285.0607
2.0000 8.525142E-01 6.027287E-01 5.473547E-08 6.027287E-01 8.525142E-01 111.4632 111.4562 82.4683 291.4562 291.4631
#-----
#ENDFILE pitch.rao

```

```

# File : yaw.rao
#
# Constants used in computations :
#   Reference length      : 1.0000
#   Water density (rho)   : 1025.0000
#   Gravity acceleration  : 9.8100
#   Waterdepth           : 23.5000
#   Ref.pt incident wave : ( 0.0000 0.0000)
#   Forward speed        : 0.0000 m/s
#
# Reference point of body 1: ( 0.000 0.000 1.650)
# MEANVALUE : 0.0000E+00
# AMP/PHASE
#-----
#RAOTYPE : MOTION
#COMPONENT : 6
#UNIT : deg/m
#NBHEADING 5
#HEADING 0.00 45.00 90.00 135.00 180.00
#---w(z/s)---
0.1000 4.516747E-21 4.138419E-14 5.851644E-14 4.138419E-14 9.781472E-22 355.4321 270.0046 270.0001 269.9955 282.1659
0.2000 4.069487E-22 2.123420E-14 3.001042E-14 2.123421E-14 6.230672E-22 16.9520 270.0093 270.0003 269.9913 344.5486
0.3000 2.510663E-22 1.420108E-14 2.005449E-14 1.420108E-14 1.183789E-21 300.3148 270.0153 270.0014 269.9876 176.8390
0.4000 1.009190E-21 1.058805E-14 1.493551E-14 1.058805E-14 4.906339E-21 189.8550 270.0244 270.0050 269.9856 185.0116
0.5000 3.696627E-22 8.333361E-15 1.173818E-14 8.333359E-15 2.262543E-22 21.3055 270.0403 270.0142 269.9881 258.9626
0.6000 3.895841E-22 6.748866E-15 9.490316E-15 6.748861E-15 2.101921E-22 157.8140 270.0699 270.0354 270.0005 353.6848
0.7000 1.821363E-22 5.830241E-15 7.763691E-15 5.830226E-15 8.680053E-22 9.8662 270.1266 270.0808 270.0338 54.5425
0.8000 3.619945E-22 4.512999E-15 6.330119E-15 4.512959E-15 8.087906E-22 62.1199 270.2345 270.1727 270.1080 312.8364
0.9000 1.978934E-22 3.593809E-15 5.051760E-15 3.593718E-15 3.870642E-22 293.2965 270.4312 270.3438 270.2521 354.9016
1.0000 1.455049E-22 2.704637E-15 3.846189E-15 2.704426E-15 4.775769E-22 108.1284 270.7693 270.6306 270.4991 25.4596
1.1000 2.541467E-22 1.806834E-15 2.678632E-15 1.806836E-15 4.423526E-22 158.1140 271.3320 271.0508 270.8730 284.6077
1.2000 1.132205E-22 8.888533E-16 1.557622E-15 8.878118E-16 3.186470E-22 223.2739 272.4656 271.5539 271.4140 92.4069
1.3000 1.767745E-22 4.597093E-17 5.248822E-16 4.251259E-17 5.639420E-22 290.7814 63.9681 271.5311 87.3784 2.8931
1.4000 1.440505E-22 9.594961E-16 3.563442E-16 9.625598E-16 4.895088E-22 202.5793 90.8297 96.6205 92.0155 338.1435
1.5000 2.144237E-22 1.830427E-15 9.956523E-16 1.836400E-15 3.258347E-22 210.9330 92.0891 97.9542 92.7343 350.1023
1.6000 1.055369E-22 2.647616E-15 1.340935E-15 2.657046E-15 5.884861E-22 215.4696 92.5803 102.1676 92.9967 309.5499
1.7000 1.473130E-22 3.385710E-15 1.346197E-15 3.397199E-15 1.587725E-22 84.8302 92.5591 113.8395 92.8169 290.8149
1.8000 3.325109E-23 4.037761E-15 1.280776E-15 4.048247E-15 1.339836E-22 270.8607 91.1941 145.5143 91.3470 332.4441
1.9000 7.195291E-23 4.530826E-15 2.033347E-15 4.538386E-15 1.650200E-22 263.7337 86.8967 181.2560 86.9972 46.7796
2.0000 1.232944E-22 4.615807E-15 3.569131E-15 4.620142E-15 1.632087E-22 346.0205 78.4592 188.4340 78.5392 17.2355
#-----
#ENDFILE yaw.rao

```

Remaining Life

In Line

Corrosion Rate	Corrosion Thickness	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
0 mm/year	0 mm	0.00299	0.0019	0.0014	0.002	0.0014	0.00186
0,2 mm/year	4 mm	0.00389	0.0026	0.0019	0.0025	0.0019	0.00255
0,4 mm/year	8 mm	0.00416	0.0033	0.0024	0.0021	0.0024	0.0033
0,7 mm/year	14 mm	0.00891	0.0059	0.0044	0.0047	0.0044	0.00485

Corrosion Rate (mm/year)	Corrosion Thickness (mm)	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
0	0 mm	334	539	700	505	700	539
0.2	4 mm	257	392	514	402	514	392
0.4	8 mm	240	303	425	477	425	303
0.7	14 mm	112	169	226	214	226	206

Between Line

Corrosion Rate	Corrosion Thickness	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
0 mm/year	Initial	0.00188	0.002	0.001157	0.0013	0.001313	0.0011
0,2 mm/year	4 mm	0.0026	0.0028	0.001564	0.0018	0.001798	0.0014
0,4 mm/year	8 mm	0.00356	0.0037	0.002026	0.0024	0.002477	0.0021
0,7 mm/year	14 mm	0.0059	0.0061	0.003404	0.0039	0.004123	0.0034

Corrosion Rate (mm/year)	Corrosion Thickness (mm)	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
0	0	532	495	865	777	762	949
0.2	4	385	359	639	567	556	702
0.4	8	281	271	493	425	404	488
0.7	14	170	164	294	255	243	290

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini ialah hasil-hasil analisis untuk menjawab rumusan permasalahan yang telah dirumuskan sebagai berikut:

1. Setelah beroperasi selama 20 tahun, CALM Buoy tuban memiliki sisa umur kelelahan sebesar 257 tahun akibat laju korosi 0,2 mm/tahun, 240 tahun akibat laju korosi 0,4 mm/tahun, dan 112 tahun akibat laju korosi terekstrim yaitu 0,7 mm/tahun pada kondisi *In Line*. Sedangkan dalam kondisi *Between Line* CALM Buoy Tuban memiliki sisa umur kelelahan sebesar 359 tahun pada laju korosi 0,2 mm/tahun, 271 tahun pada laju korosi 0,4 mm/tahun, dan 164 tahun pada laju korosi terekstrim yaitu 0,7 mm/tahun.
2. Setelah melakukan Penggantian 1 tali pada Line 1 umur kelelahan CALM Buoy Tuban menjadi sebesar 334 tahun pada laju korosi 0,2 mm/tahun, 303 tahun pada laju korosi 0,4 mm/tahun, dan 169 tahun pada laju korosi terekstrim yaitu 0,7 mm/tahun dalam kondisi *In Line*. Sedangkan dalam kondisi *Between Line* umur kelelahan CALM Buoy Tuban sebesar 359 tahun pada laju korosi 0,2 mm/tahun, 271 tahun pada laju korosi 0,4 mm/tahun, dan 164 tahun pada laju korosi terekstrim yaitu 0,7 mm/tahun
3. Setelah melakukan penggantian 2 tali yaitu pada Line 1 dan Line 2 umur kelelahan CALM Buoy Tuban dalam kondisi *In Line* menjadi sebesar 334 tahun pada laju korosi 0,2 mm/tahun, 303 tahun pada laju korosi 0,4 mm/tahun, dan 206 tahun pada laju korosi terekstrim yaitu 0,7 mm/tahun. Sedangkan pada kondisi *Between Line* umur kelelahan menjadi 495 tahun pada laju korosi 0,2 mm/tahun, 404 pada laju korosi 0,4 mm/tahun, dan 243 tahun pada laju korosi terekstrim yaitu 0,7 mm/tahun. Umur kelelahan ini

telah memenuhi *Safety Margin* yang telah ditentukan yaitu sekurang-kurangnya ialah 200 tahun.

4. Resiko sistem CALM Buoy Tuban secara kuantitatif memiliki peluang kegagalan sebesar 0.0005 pada posisi *between line* dan 0.001 pada posisi *in line*. Secara kualitatif konsekuensi kegagalan berada pada kelas A pada aspek keselamatan, C pada aspek lingkungan, dan E pada aspek bisnis. Berdasarkan matriks resiko DNV RP-G101 yaitu berada pada daerah Hijau (*Low Risk*) pada aspek Keselamatan (*Safety*), daerah kuning (*Medium Risk*) pada aspek Lingkungan dan daerah merah (*High Risk*) pada aspek Bisnis. Penanggulangan berupa inspeksi dan monitoring yang berkala disarankan untuk memastikan resiko tidak bertambah.

5.2 Saran

Adapun saran yang ditujukan untuk perkembangan penelitian yang serupa dengan tugas akhir ini ialah:

1. Dalam analisa perpanjangan umur operasi untuk penggantian tali diperlukan analisis kelelahan yang lebih detail yakni pada tiap segment *Anchor Leg* sehingga tidak seluruh tali yang diganti namun cukup bagian segmen yang memiliki umur kritis saja yang dilakukan penggantian tali
2. Dalam analisis perpanjangan umur operasi diperlukan juga pertimbangan dalam segi biaya dalam mengganti tali/bagian tali yang sudah tidak memenuhi kriteria
3. Analisis Jadwal (*Scheduling*) RBI (*Risk Based Inspection*) diperlukan untuk menindak lanjuti resiko yang telah dianalisis.

DAFTAR PUSTAKA

- American Bureau of Shipping. 2015. *Life Extension Methodology for Floating Production Installations*. New York
- American Petroleum Institute. 2005. *Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping System for Floating Structures*. 3rd Edition,
- American Petroleum Institute. 1997. *Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platform-LRFD*. First Edition.
- Bureau Veritas. 2014. *Hydrostar for Experts User Manual*. Research Department Bureau Veritas.
- Bureau Veritas. 2015. *Ariane8 User Guide*. Research Department Bureau Veritas.
- Journee J.M.J and Massie W.W 2001. *Offshore Hydromechanic first edition*. Delft University of Technology: 568
- Det Norske Veritas. 2010. *Risk Based Inspection of Offshore Topsides Static Mechanical Equipment*. Norwegian.
- Kai-Tung Ma & Monti Phillippe. 2014. "Life Extension of Mooring System for Benchamas Explorer FSO". Houston 19th Offshore Symposium.
- Djatkiko, E.B. 2006. *Analisa Kelelahan Struktur Bangunan Laut*. Modul Perkuliahan. Jurusan Teknik Kelautan ITS.
- Norsk Olje & Gas. 2012. "Norwegian Oil and Gas Recommended Guidelines for The Assessment and Documentation of Service Life Extension of Facilities".
- Rosyid, D.M. 2007. *Pengantar Rekayasa Keandalan*. Airlangga University Press.
- Ryauchuduri, Samik. 2008. "Introduction to Monte Carlo Simulation" Proceeding of the 2008 Winter Simulation Conference
- Bhattacharyya, Rameswar. 1972. *Dynamic of Marine Vehicles* U.S Naval Academy.
- Kristensen & Lutzen. 2012. "Existing Design Trends for Tankers and Bulk Carriers – Design Changes for Improvement of the EEDI in the Future". Energy Efficiency Design In the Future.

Chen, Xiaobo. 2011. "Offshore Hydrodynamic and Application". The IES Journal Part A.

Liu, Yingzhong and Miao Guoping. 1998. "Theory of motion of ships on waves". Shanghai Jiao Tong University Press.

Wichers, J.E.W. 1988. "Wave-Current Interaction Effects on Moored Tankers in High Seas". Offshore Technology Conference. Paper No.OTC5631, Houston.

BIODATA PENULIS



Fadly Akbar Nasher dilahirkan pada 30 Juni 1994 di Jakarta. Penulis berdarah minang ini merupakan anak kedua dari empat bersaudara pasangan Nukaddis Nasher dan Reni Anggraeni. Telah menempuh Pendidikan di SDN Gondangdia 01 Jakarta Pusat, SMPN 13 Bandung, dan SMAN 5 Bandung. Penulis melanjutkan studi S-1 di Teknik Kelautan FTK-ITS sejak tahun 2012. Selama kuliah, penulis aktif dalam berbagai kegiatan non-akademik yaitu Unit Kegiatan Mahasiswa Kendo ITS sebagai Ketua Umum periode 2014/2015 dan sempat menjuarai beberapa kejuaraan serta dalam Lembaga Dakwah Jurusan Bahrul Ilmi sebagai Kepala Departemen Syiar kepengurusan 2013/2014. Penulis sempat aktif dalam dunia kepenulisan yaitu menjadi Jurnalis dan Staff Media Informasi HIMATEKLA 2013/2014, dan juga menjadi Pimpinan Redaksi dalam pembuatan buku sejarah Keping Juang JMMI ke-25. Penulis melaksanakan kerja praktek di PT. Marka Inspektindo Technical yang merupakan perusahaan jasa inspeksi teknis dengan fokus studi kasus kebocoran pipa gas milik PGN di laut Jawa berdasarkan *Rules* DNV OS-F101. Dalam mempersiapkan tugas akhir ini, penulis mengikuti pelatihan perangkat lunak HydroSTAR dan ARIANE yang disediakan oleh Bureau Veritas. Sehingga dalam tugas akhir ini yang berjudul “Analisa Perpanjangan Umur Operasi CALM Buoy Tuban milik PT.Pertamina Berbasis Resiko”, penulis menggunakan perangkat lunak tersebut dalam pemodelan *vessel* dan perhitungan umur kelelahan .

Contact Person : nasher3006@gmail.com